

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

Pro gradu -tutkielma
Fysiikan opettajan suuntautumisvaihtoehto

**FYSIIKAN YLIOPPILASKOKELAIDEN KÄSITYKSIÄ HIILIDIOKSIDIN ROOLISTA
ILMASTONMUUTOKSESSA**

Johanna Joensuu

26.3.2020

Ohjaajat: professori Ismo Koponen (HY) ja apulaisprofessori Terhi Mäntylä (JYU)

Tarkastajat: Ismo Koponen ja Terhi Mäntylä

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIIKAN OSASTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2a)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Fysiikan opettajan suuntautumisvaihtoehto	
Tekijä – Författare – Author Johanna Joensuu			
Työn nimi – Arbetets titel – Title FYSIKAN YLIOPIILASKOKELAIDEN KÄSITYKSIÄ HIILIDIOKSIDIN ROOLISTA ILMASTONMUUTOKSESSA			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year 26.3.2020	Sivumäärä – Sidantal – Number of pages 54
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Ilmastonmuutos on monimutkainen ja monitieteinen ilmiö, johon liittyy lukematon määrä osittain huonosti tunnettuja vuorovaikutuksia ja takaisinkytkentöjä. Ilmiön ymmärtäminen vaatii huomattavan käsiteviidakon hallitsemista ainakin jollakin tasolla. Koulun merkitys oppijoiden maailmankuvan muokkaajana on keskeinen, mutta suomalaisia tutkimustuloksia koulutien aikana muodostuneista käsityksistä ilmastonmuutoksesta on vähän.</p> <p>Konstruktivisen oppimiskäsityksen mukaan yksilöt kehittävät ymmärrystään aktiivisesti, olemassa olevien ajatusmalliensä pohjalle. Ihmisellä voi olla tietystä aiheesta samaan aikaan myös useita vaihtoehtoisia käsityksiä. ”Virheellisten” käsitysten erottaminen ”oikeista” ei siis ole yksiselitteistä. Opetuksen tuloksena voi joskus olla kahden perspektiivin tilanne, jossa uusi aines otetaan aikaisempien ideoiden rinnalle. Lähihistoriassa sekä luonnontieteiden tutkimus että opetus ovat olleet näkökulmaltaan reduktionistisia: ajatellaan, että monimutkaiset systeemit voidaan ymmärtää analysoimalla niiden yksinkertaisempia komponentteja. Tästä näkökulmasta maailman voi selittää lineaaristen syy-seuraussuhteiden avulla niin, että luonnosta tulee deterministinen ja ennustettava. Reduktionistinen ajattelu on johtanut huomattavaan tiedon lisääntymiseen, mutta globaalien, monimutkaisten ja kokonaisvaltaisten ongelmien, kuten ilmastonmuutoksen, tarkasteluun lähestymistapa ei riitä. Sen rinnalle tarvittaisiin systeemiajattelua, ajattelutapaa, jossa pyritään selittämään, ymmärtämään ja tulkitsemaan monimutkaisia ja dynaamisia systeemejä.</p> <p>Maapallon ilmasto muuttuu ja on muuttunut aina. Teollisen aikakauden alettua muutos on kuitenkin ollut ennennäkemättömän nopeaa. On epätodennäköistä, että mitkään ilmastoon vaikuttavista luonnollisista sykleistä selittäisivät havaittua trendiä. Fossiilisten polttoainneiden käytön lisääntyminen on kasvattanut ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuutta. Tästä on seurannut ilmakehän ja sen seurauksena myös merien ja maa-alueiden lämpenemistä. Ilmastonmuutosta on käsitelty luonnontieteiden oppitunneilla jo vuosia. Suomalaisten lukion opetussuunnitelman perusteiden yleisissä tavoitteissa mainitaan tietoisuuden kehittäminen ihmisten toiminnan vaikutuksesta maailman tilaan, halu ja kyky toimia demokraattisessa yhteiskunnassa vastuullisesti sekä yhteisenä aihekokonaisuutena kestävä kehitys. Ilmastonmuutos mainitaan erikseen kuitenkin vain oppiainekohtaisissa opetussuunnitelman perusteissa, maantiedon kohdalla. Oppijoiden käsityksiä ilmastonmuutoksesta on tutkittu paljon eri puolilla maailmaa. Ajasta, paikasta ja kouluasteesta riippumatta esiin nousevat samat virhekäsitykset. Näistä yleisin on ns. otsoniaukkoteoria, johon liittyy usein ajatus siitä, että CO₂ (tai yleisemmin kasvihuonekaasut) tuhoavat otsonikerrosta. Lisäksi CO₂ rinnastui usein ilmansaasteisiin. Toinen virhekäsitysten kokonaisuus liittyy lyhyt- ja pitkäaikaalaiseen säteilyyn, joiden erot eivät vaikuta olevan opiskelijoiden ajatusmalleissa minkäänlaisissa roolissa. Myös kasvihuonekaasujen jakaumasta ilmakehässä on usein havaittu vääriä käsityksiä; tyypillisesti niiden ajatellaan muodostavan kerroksen, joka vangitsee ja/tai heijastaa lämpöä.</p> <p>Keväällä 2017 fysiikan ylioppilaskokeessa oli ilmastonmuutokseen liittyvä jokeritehtävä, jonka c-kohdassa piti pohtia syitä siihen, että ilmakehän kohonnut CO₂-pitoisuus muuttaa ilmastoa. Tämän työn tutkimusongelman oli selvittää, millaisia käsityksiä kokeilaillo oli CO₂:n roolista ilmastonmuutoksessa. Tutkimukseen poimittiin 19 lukion abiturienttien kaikki vastaukset. Tutkimusmenetelmänä käytettiin temaattista analyysiä. Tutkimuksessa havaittiin, että fysiikan ylioppilaskokelaiden ymmärrys ilmastonmuutoksen fysikaalisista perusteista on vaihtelevan tasoista. Virheellisistä käsityksistä yleisimpiä olivat muissakin tutkimuksissa havaitut ajatukset, että CO₂ heijastaa sähkömagneettista säteilyä, muodostaa ilmakehään kerroksen tai rajapinnan ja tuhoaa otsonikerrosta. Saadut tulokset sopivat yhteen myös oppikirjojen puutteita käsittelevien tulosten ja toisaalta suomalaisten oppikirjojen esitystavan kanssa. Ilmastonmuutos ja saastuminen on tyypillisesti opiskeltu samassa yhteydessä, jolloin niihin liittyvät käsitteet ja mekanismit sekoittuvat helposti. Oppimateriaalin tapa kuvittaa kasvihuoneilmiötä näkyy selkeästi opiskelijoiden vastauksissa ja niihin liitetyissä piirroksissa. Luonnontieteiden opetuksen traditiot eivät myöskään todennäköisesti tue systemaattisen ajattelun kehitystä.</p>			
Avainsanat: Ilmastonmuutos, opiskelijoiden käsitykset, lukio, temaattinen analyysi, luonnontieteiden oppiminen, systeemiajattelu			
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällys

1.	Johdanto	1
2.	Luonnontieteiden oppiminen ja opetus	2
2.1	Konstruktivistinen käsitys tiedeoppimisesta	2
2.2	Systeemiajattelu	6
2.3	Ilmastonmuutoksen käsittely opetuksessa.....	7
3.	Ilmastoa muuttavat tekijät	13
3.1	Ilmastoon vaikuttavat luonnolliset tekijät	14
3.1.1	Maapallon säteilytasapaino	14
3.1.2.	Maan kiertoradan muutokset.....	17
3.1.3	Auringon aktiivisuus	18
3.1.4	Tulivuorenpurkaukset.....	18
3.1.5	Valtamerten kierrot.....	19
3.1.6	Kasvihuoneilmiö	20
3.2	Ilmastonmuutos	21
3.2.1	Luonnollisten tekijöiden vaikutus	22
3.2.2	Voimistuneen kasvihuoneilmiön vaikutus	23
3.3	Käsitykset ilmastonmuutoksesta	31
4.	Tutkimusmetodologia.....	35
4.1	Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	35
4.2	Aineisto ja sen käsittely.....	35
4.3	Aineiston analyysi	37
4.4	Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys	38
5.	Fysiikan ylioppilaskokelaiden käsityksiä hiilidioksidin roolista ilmastonmuutoksessa ..	39
5.1.	Hiilidioksidin rooliin liittyviä käsityksiä.....	39
5.2.	Vaikutusmekanismeihin liittyviä käsityksiä.....	40
5.3	Pohdinta.....	46
6.	Yhteenveto	50
7.	Kirjallisuusluettelo	51

1. Johdanto

Totuudenmukaisen, ympäristön paineita kestävänsä käsityksen muodostaminen mistä tahansa asiasta vaatii ainakin jonkin verran oikeaa tietoa kyseisestä aihepiiristä. Ilmastomuutos on tästä hyvä esimerkki. Se on monimutkainen ilmiö, johon liittyy lukematon määrä osittain huonosti tunnettuja vuorovaikutuksia ja takaisinkytkentöjä. Ilmiön ymmärtäminen vaatii huomattavan käsiteviidakon hallitsemista ainakin jollakin tasolla. Yläkoulu- ja lukioikäisten oppilaiden ilmastomuutostietous onkin yksi tärkeimmistä ennustajista sen suhteen, uskovatko oppilaat ilmastomuutoksen olevan todellista ja ihmisen aiheuttamaa (Stevenson ym. 2016).

Ilmastomuutosta pidettiin kiistämättömänä tosiasiana jo IPCC:n 4. raportissa, ja uusimmassa raportissa (IPCC 2014) ilmastomuutosta kuvattiin ”yksiselitteisenä” ja ”hyvin todennäköisesti ihmisen aiheuttamana”. Yleisön käsitykset poikkeavat silti selvästi tiedeyhteisön yksimielisyydestä. Vuonna 2015 suomalaisista 84 % uskoi, että ilmastomuutoksen vaikutukset ovat jo nähtävillä ja 74 % piti ilmastomuutosta pääosin ihmisen aiheuttamana (Ilmastobarometri 2015). Noin puolet vastaajista kuitenkin arvioi, että tutkijat ovat ilmastomuutoksen syistä erimielisiä.

Aikuisten käsityksiin ja asenteisiin vaikuttaminen on hyvin vaikeaa, jopa mahdotonta, jos henkilöllä on hyvin vahva ideologinen näkemys asiasta (Kata 2012, Grimes 2016). Nuorten näkemykset ovat kuitenkin joustavampia, ja heidän maailmankuvansa on vasta muotoutumassa (Stevenson ym. 2016). Oppimateriaali lienee kouluikäisten useimmin lukema tietoaaineisto. Lisäksi koulua ja opettajia pidetään luotettavina tiedonlähteinä. Koulun merkitys oppijoiden maailmankuvan muokkaajana on siis keskeinen. Tieteellisen tiedon välittämisen lisäksi kouluissa olisi hyvin tärkeää opettaa tieteellistä ajattelutapaa. Tieteeseen ei ole tarkoitus ”uskoa”; sen sijaan tiede voi tarjota eri tilanteissa käyttökelpoisia todellisuuden malleja (Taber 2017). Niihin tutustuttuaan ihminen saattaa ottaa ne omassa elämässään käyttöön mahdollisena tapana tulkita omaa ympäristöä. Oppijoille koulutien aikana muodostuneita käsityksiä ilmastomuutoksesta on tutkittu paljon, mutta Suomesta tutkimustuloksia ei juurikaan ole.

Kevään 2017 ylioppilaskirjoitusten fysiikan kokeen jokerikysymys käsitteli ilmastomuutosta, ja vastaukset tarjoavat erinomaista tutkimusaineistoa aihepiirin tarkasteluun. Käsillä oleva työ pyrkii osaltaan avaamaan abiturienttien käsityksiä tästä ihmiskuntaa laajasti ja globaalisti ravistelevasta ongelmasta.

2. Luonnontieteiden oppiminen ja opetus

2.1 Konstruktivistinen käsitys tiedeoppimisesta

Ihmisellä on luontainen kyky ja tarve muodostaa selityksiä ympäristöstään. Konstruktiivisen oppimiskäsityksen mukaan yksilöt kehittävät ymmärrystään aktiivisesti, olemassa olevien ajatusmalliensä pohjalle (Driscoll 2000). Havainnot ruokkivat ajattelua, ja näin yksilö rakentaa eli konstruoi omaa käsitysrakennettaan, siis omaa malliaan ympäröivästä maailmasta. Tämän mallin pohjalta hän tekee vastaavissa tilanteissa ennusteen (usein tiedostamattaan) ja valitsee toimintatapansa sen perusteella. Toiminnan seuraukset joko vahvistavat tai muokkaavat olemassa olevaa mallia.

Konstruktivismin ”isänä” voidaan pitää sveitsiläistä Jean Piagetia (1896–1980). Hän oli psykologi, joka tutki tieteellisten aiheiden ajatteluun ja oppimiseen liittyviä kysymyksiä. Piagetin (1972) mukaan lapsi muodostaa monenlaisia käsityksiä maailmasta jo ennen muodollisen opetuksen alkamista, ja uuden oppiminen perustuu aina olemassa olevaan skeemaan, sisäiseen malliin, johon uusi kokemus sovitetaan. Tämän sovituksen tuloksena konstruoidaan uusi skeema.

Monet yksilön ennen kouluikää kohtaamat tilanteet liittyvät fysiikan ilmiöihin. On siis selvää, että kouluopetuksen alkaessa oppilaalla on jo jonkinlainen käsitys siitä, mitä on esimerkiksi ”valo”. Lapsen varttuessa käsityksiä muokkaavat omat kokemukset, mutta myös esimerkiksi koulutus ja opettajat, perhetausta, ystävät, naapurit sekä media. Käsitys puhujan luotettavuudesta vaikuttaa hänen mielipiteensä painoarvoon; opettajien ja poliittisten tai hengellisten johtajien näkemykset saattavat olla merkittävämpiä kuin vaikkapa naapureiden.

Piagetin lähestymistapaa summaten Glasersfeld (1989) totesi, että oppimista tapahtuu, kun käytetty skeema ei tuota oletettua tulosta vaan johtaa häiriötilanteeseen (kognitiivinen konflikti). Tämä häiriö johtaa sopeutumiseen, joka luo uuden tasapainotilan. Oppiminen sisältää siis oppijan sisäisten skeemojen kehitystä, erityisesti muutoksia, jotka tehdään skeeman pohjalta oletetun ja todellisen kokemuksen välillä havaittujen ristiriitojen takia. Toisinaan uusi tieto ymmärretään Popperin (2009) mukaan (väärin) niin, että se tukee oppijan omia ennakkokäsityksiä; uusia termejä voidaan esimerkiksi käyttää vanhojen ideoiden uudelleennimeämiseen. Myös ideoiden osittainen oppiminen on mahdollista, ja lisäksi ihmisellä voi olla tietystä aiheesta samaan aikaan useita vaihtoehtoisia käsityksiä, joita hän

testaa todellisuutta vasten (Taber 2017). ”Virheellisten” käsitysten ja ajatusmallien erottaminen ”oikeista” ei siis ole yksiselitteistä.

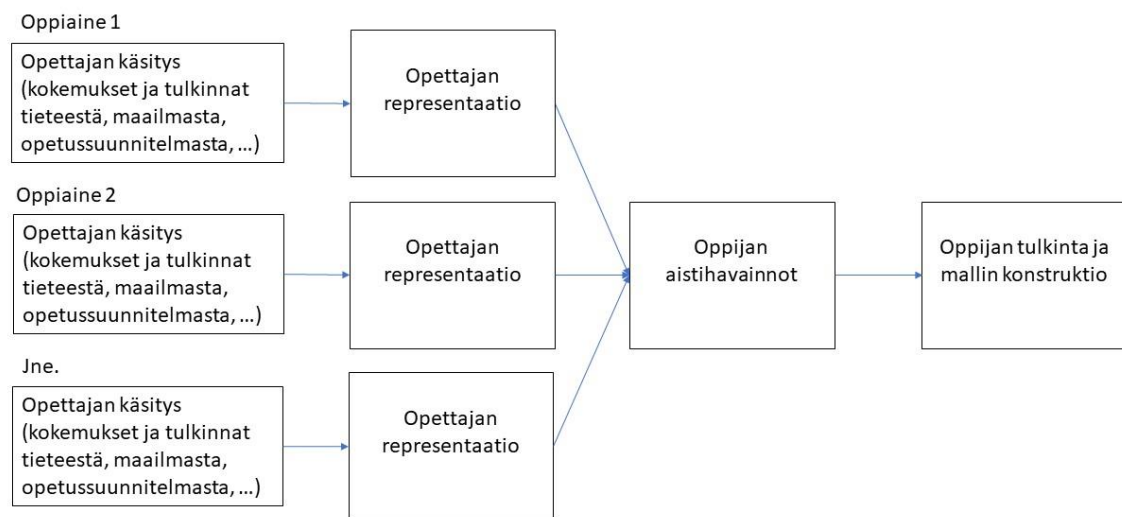
Konstruktivisen tutkimustradition alkuna voidaan pitää Driverin ja Easley’n artikkelia (1978). Siinä tekijät pohtivat, ovatko 14-vuotiaiden esittämät näkemykset lämpölaajenemisesta väärinkäsityksiä, virheitä, osittaisia ymmärryksiä vai jotain muuta? He ehdottivat termiä vaihtoehtoiset rakenteet (alternative frameworks), joka voi sisältää myös ilman muodollista opetusta intuitiivisesti muodostetut käsitykset.

Se, miten lapsen ajatuksia luokitellaan, on Taberin (2009) mukaan tärkeää kahdesta syystä. Luokkien nimet kantavat merkityksiä; on väliä sillä, sanotaanko oppijan ideoita ajatuksiksi, käsityksiksi, teorioiksi, malleiksi vai joksikin muuksi. Vaihtelevat sanavalinnat luovat toisaalta myös sekaannusta, koska tutkijat käyttävät termejä ristiin. Omassa työssäni olen päätenyt yksinkertaisesti termiin ”käsitykset”. Se antaa tilaa myös oikeille ja oikeansuuntaisille käsityksille, jotka voivat olla peräisin kouluopetuksesta tai jostain muualta. Gilbertin ym. (1982) ajatus ”lasten tieteestä” on kiinnostava. He erottavat lasten tieteen sekä tutkijoiden tieteestä että opettajan tieteestä, jonka katsovat olevan jossain edellisten välillä. Kouluopetus ei heidän mukaansa ole mitään näistä, vaan edustaa opettajan tiedettä, joka välittyy opetussuunnitelman (opetussuunnitelman tiede) kautta.

Samaan aihepiiriin liittyy myös Popperin (1979) ajatus ”kolmesta maailmasta”: voidaan ajatella, että on olemassa objektien maailma, henkilökohtaisen subjektiivisen tiedon maailma ja objektiivisen tiedon maailma. Näistä kolmas maailma koostuu teorioista, periaatteista, puhtaista ideoista jne., jotka ovat olemassa vain ideaalisina. Niiden sisältöä voi olla representaatioina ensimmäisessä maailmassa (esimerkiksi kirjat ja luennot) ja toisessa maailmassa (ajattelun kohteina, ideoina ”niin kuin ne koetaan”). Toisessa maailmassa ne perustuvat kuitenkin siihen, miten yksilö kokee maailman, mukaan lukien heidän kokemuksensa asioista, jotka joku on näyttänyt tai kertonut heille. Nämä näyttämiset ja kertomiset eivät kuitenkaan ole ideoita vaan niiden representaatiota.

Tämän perusteella tuntuu suorastaan uskomattomalta, että tieteelliset käsitykset voivat olla edes suurin piirtein yhteisiä: Opettajalla on opetettavasta asiasta oma, henkilökohtainen käsitys, joka perustuu hänen omiin kokemuksiinsa ja tulkintoihinsa muun muassa tieteestä, maailmasta ja opetussuunnitelmasta. Opetus- ja oppimisprosessin aikana opettaja luo omasta käsityksestään

jonkin representaation, josta oppija tekee aistihavaintoja (Taber 2009, Kuva 1). Konstruktivistien teorian mukaan oppija yrittää vuorostaan aktiivisesti (vaikkei välttämättä tarkoituksella tai tietoisesti) tehdä havainnoistaan selkoa ja konstruoi subjektiivisesti oman versionsa aiheesta. Samaa aihetta saatetaan käsitellä eri oppiaineissa, jolloin useamman opettajan (mahdollisesti jopa ristiriitaiset) representaatiot vaikuttavat jokainen oppijan muodostamaan malliin (Kuva 1).



Kuva1. Opetus-oppimisprosessin kulku.

Lapsen tieteen ja opetussuunnitelman tieteen vuorovaikutus voikin Gilbertin ym. (1982) mukaan johtaa monenlaisiin tuloksiin. Opetus voi sujuvasti korvata oppijan ideat. Skaalan toisessa päässä oppijan sisäiset rakenteet voivat olla niin vahvat, ettei opetus vaikuta niihin mitenkään. Joskus tuloksena voi olla kahden perspektiivin tilanne, jossa uusi aines otetaan aikaisempien ideoiden rinnalle. Uutta mallia käytetään ehkä koesuorituksessa, mutta se ei toimi henkilökohtaisena mallina maailmasta.

Solomon (1993) raportoi, että oppilaiden kahdenlainen tieto vaikuttaa olevan eri paikkoihin ryhmiteltyinä muistissa, eikä niiden välillä ole yleensä kovin vahvaa yhteyttä. Sopiva vihje saattaa kuitenkin riittää siirtämään ajattelun esimerkiksi arkitiedosta tieteellisen tiedon puolelle. Koe- tai haastattelutilanteessa vastaajalla ei välttämättä ole valmista vastausmallia muistissaan, vaan hän joutuu ainakin osittain luomaan sellaisen käytössään olevien mentaalisten mallien

pohjalta (Taber 2009). Voi siis olla, ettei opiskelija ole koskaan aiemmin verbalisoinut malliaan tai perustellut sitä edes itselleen.

Taber (2009) myös esittää, että oppilaat käyttävät tieteellisiä periaatteita ongelmanratkaisuun todennäköisemmin silloin, kun ongelma esitetään muodollisena harjoituksena ”tieteellisessä kontekstissa”, mutta käyttävät vaihtoehtoisia selityksiään uusissa, etenkin ”arkipäivän” tilanteissa. Suomalaisten ylioppilaskirjoitusten jokeritehtävää voi pitää luonteeltaan joko tieteellisenä kontekstina tai tieteellisen ja arkipäivän tilanteen välimaastoon sijoittuvana. Jälkimmäinen saattaa olla vastaajan kannalta vaikeampi, koska käsillä olevan ongelman ratkaiseminen vaatii monentyyppisten mallien yhteensovittamista stressaavassa tilanteessa.

Sekä Koponen (2014) että Taber (2009) korostavat, että oppimismotivaation kannalta on tärkeää antaa arvoa oppijan olemassa olevalle tiedolle ja käsityksille, vaikka ne poikkeaisivat tieteellisestä. Tällöin käsityksiin on todennäköisesti helpompi vaikuttaa. Taber (2009) esittää myös kysymyksen, onko muodollisen tieteen tarpeellistakaan korvata muita tapoja ymmärtää luontoa ja ympäristöä? Näillä muilla tavoilla voi olla arvoa perheelle tai kulttuurille (perinteinen ekologinen tieto). Tämä kysymys on Taberin mukaan keskeinen kulttuureissa, joissa kouluopetus voidaan kokea suoranaista kulttuuri-imperialismina, jolla perinteinen tieto halutaan syrjäyttää.

Tieteellisen tiedon kehittymisen ja oppimisen yhteneväisyyksiä ei voi sivuuttaa. Kurki-Suonio ja Kurki-Suonio (1994) esittävät tieteellisen tiedon tunnusmerkkeinä rakenteellisuuden ja edistävyyden. Näistä edistävyyden tarkoittaa sitä, että tieteellinen tieto on itseään korjaavaa, lisääntyvää ja uudistuvaa. Pyrkimys rakenteellisuuteen tarkoittaa tiedon palasten jäsentämistä kokonaisuuksiksi, joiden avulla voi muodostaa käsityksen maailmasta. Kurki-Suonion ja Kurki-Suonion mukaan tieteellisen tiedon edistymisprosessissa uusia tuloksia verrataan aina olemassa olevaan tietorakenteeseen. Jos yhteensopivuus on hyvä, uudet tulokset voidaan lisätä rakenteeseen, mutta jos havaitaan ristiriita, uusia tuloksia on tarkasteltava kriittisesti ennen niiden hyväksymistä. Tämän voi rinnastaa tilanteeseen, jossa oppija vertaa (mahdollisesti tiedostamattaan) hänelle tarjottua uutta tietoa olemassa oleviin käsityksiinsä ja hyväksyy tai hylkää uuden tiedon sen perusteella, miten hyvin se sopii olemassa olevaan rakenteeseen.

Tästä näkökulmasta fysiikan opetusta on luontevaa lähestyä esimerkiksi Koposen (2014) esittelemän tieteellisen metodin mukaisesti: riittävästä määrästä havaintoja voidaan johtaa

lainalaisuuksia (induktio), teoriasta voidaan johtaa hypoteeseja, joita voidaan sitten testata (deduktio), ja näitä voidaan yhdistellä (generatiivinen prosessi). Luonnontieteiden historiallisen kehityksen ja yksilön oppimisprosessin yhteneväisyyksiä onkin käytetty hyväksi fysiikan opetuksessa, mutta Mäntylä (2013) varoittaa viemästä tätä rinnastusta liian pitkälle; kukin luonnontieteilijä on oman aikansa huippuasiantuntija, kun taas oppija on aihepiirissä vasta-alkaja.

Kokeellisuus on oleellinen osa fysiikan opetusta, ja sen roolia on entisestään korostettu viimeaikaisissa opetussuunnitelmauudistuksissa. Tavoitteena on paitsi oppia mittausten suorittamista ja tulosten tulkintaa, myös oppia asettamaan tarkoituksenmukaisia kysymyksiä ja tekemään johtopäätöksiä (Koponen 2014). Kurki-Suonio ja Kurki-Suonio (1995) muistuttavat, että koulufysiikan mahdollisuudet aitoon empiriaan ovat olemattomat, ja suurelta osin joudutaan tyytymään kerrottuun empiriaan. Ilmastonmuutos on aiheena esimerkki ilmiöstä, jonka opetus ei voi perustua opiskelijoiden omiin, kokeellisiin havaintoihin. Kerrottu empiriakin jää vähiin, koska globaalin mittakaavan ilmiöstä ei ole olemassa kokeellisia tuloksia. Opetuksen lähestymistapa on näin välttämättä teoreettinen, mitä Kurki-Suonio ja Kurki-Suonio pitävät oppijalle erittäin vaativana.

2.2 Systeemiajattelu

Lähihistoriassa sekä tutkimus että luonnontieteiden opetus ovat olleet näkökulmaltaan hyvin reduktionistisia (Orgill ym. 2019). Reduktionismi voidaan kuvata ajatuksena, jonka mukaan monimutkaiset systeemit tai ilmiöt voidaan ymmärtää analysoimalla niiden yksinkertaisempia komponentteja. Tästä näkökulmasta maailman voi selittää lineaaristen syy-seuraussuhteiden avulla niin, että luonnosta tulee deterministinen ja ennustettava. Sama ajattelutapa on luonnollisesti näkynyt myös luonnontieteiden opetuksessa. Tiedon redusoiminen sarjaksi neutraaleja, kontekstista riippumattomia faktoja, jotka voidaan oppia ja joita voidaan arvioida, ei ole kuitenkaan ongelmattonta (Orgill ym. 2019). Kuten edellä on todettu, opiskelijat oppivat merkityksellisimmin, kun he voivat liittää uuden tiedon aiemmin oppimaansa. Tiukka oppiainejako johtaa kritikoiden mukaan myös siihen, ettei oppija pysty yleistämään oppimaansa tai käyttämään sitä uudessa yhteydessä (Orgill ym. 2019). Reduktionistinen lähestymistapa myös esittää tieteellisen tiedon puhtaan objektiivisena ja sivuuttaa ihmisen vaikutuksen siihen, miten tiedettä tehdään ja tuloksia tulkitaan. Reduktionistinen ajattelu on johtanut huomattavaan tiedon lisääntymiseen koskien ympäröivää maailmaa ja suuriin teknologisiin edistysaskeliin (Orgill ym. 2019).

Ihmiskunnan nykyhetken haasteet, kuten kestävyys, saastuminen ja ilmastonmuutos, ovat kuitenkin luonteeltaan globaaleja, monimutkaisia ja kokonaisvaltaisia. Niiden tarkasteluun reduktionistinen lähestymistapa ei riitä. Monien tieteenalojen, kuten meteorologian ja biologian, ytimessä onkin useampien organisaatiotasojen samanaikainen tarkastelu. Ilmastonmuutosta tarkasteltaessa näitä ovat esimerkiksi kvantit, molekyylit, ilmakehä, Maa ja Aurinko-Maa-systeemi. Tarkasteltavat ilmiöt ja prosessit tapahtuvat näiden tasojen kautta, ja niiden kautta ilmiöitä voi myös ymmärtää. Ajattelutapaa, jossa selitetään, ymmärretään ja tulkitaan monimutkaisia ja dynaamisia systeemejä, kutsutaan systeemiajatteluksi (Verhoeff ym. 2018). Systeemiajattelun taidot ovat erityisen tärkeitä, kun koulutetaan tulevaisuuden globaaleja kansalaisia.

Systeemiajattelu on eri yhteyksissä määritelty eri tavoin. Useimmille määrittelyille on kuitenkin yhteistä se, että systeemi on kokonaisuus, joka koostuu keskenään vuorovaikuttavista osista ja jonka toiminnalla on joku lopputulos, jonka saavuttamiseen tarvitaan systeemin kaikkia osia ja niiden välisiä vuorovaikutuksia (Lavi ja Dori 2019, Orgill ym. 2019, Verhoeff ym. 2018). Lavi ja Dori (2019) lisäävät, että systeemiin kuuluu eri integraatiotasoja, ja jokaiseen integraatiotasoon kuuluu koko systeemin ominaisuuksia, joita ei ole alemman integraatiotason osilla tai niiden yhdistelmillä. Systeemiajattelua on olemassa useilla tasoilla mikroskooppisesta makroskooppiseen, ja tietyn systeemin rajat määrittelee sen tarkastelija (Orgill ym. 2019). Systeemiajattelulla tarkoitetaan kykyä ymmärtää ja tulkita monimutkaisia systeemeitä, ja siihen kuuluu systeemin osien välisten yhteyksien ja suhteiden visualisointi, systeemin ajan mukana muuttuvan (temporaalisen) käytöksen tarkastelu ja sen tarkastelu, kuinka systeemitason ilmiöt nousevat systeemin osien välisistä vuorovaikutuksista (Orgill ym. 2019). Verhoeff ym. (2018) erottelevat systeemiajattelun taidoissa eri tasoja: Perustasolla oppija pystyy tunnistamaan systeemin osat ja prosessit, siis systeemin komponenttien väliset suhteet. Korkeimmalle tasolle kuuluvat esimerkiksi kyky ymmärtää systeemien syklistä luonnetta ja temporaalista käyttäytymistä.

2.3 Ilmastonmuutoksen käsittely opetuksessa

Ilmastonmuutosta on käsitelty luonnontieteiden oppitunneilla jo vuosia. Reinfriedin ym. (2012) mukaan (yhdysvaltalaisissa) tekstikirjoissa ei kuitenkaan yleensä ole mukana lyhytaaltoisen säteilyn muuttumista pitkäaaltoiseksi sen osuttua maahan eikä lämpösäteilyn absorboituminen kasvihuonekaasuihin. Choi ym. (2010) totesivat analysoidessaan (yhdysvaltalaisia) ympäristö-

ja maantiedon oppikirjoja, ettei yksikään niistä selvästi tehnyt eroa saastumisen ja kasvihuoneilmiön tai ilmastomuutoksen välille. Toinen tarkastelluista ympäristötieteiden kirjoista ja kaksi kuudesta maantiedon kirjasta käsitteli otsonikerroksen ja kasvihuonekaasujen eroa suhteessa säteilyyn, muut kirjat eivät. Kasvihuonekaasujen jakautumista ilmakehässä käsitteli vain yksi (maantiedon) oppikirja. Kasvihuoneilmiön mekanismeja ei käsitelty yhdessäkään kirjassa (Choi ym. 2010).

Reinfried ym. (2012) esittävät, että oppikirjojen puutteet edesauttavat niin kutsutun otsoniaukkomallin muodostumista opiskelijoiden käsityksissä (mallia käsitellään tarkemmin luvussa 3.3). Se vaikuttaa järkevältä ja uskottavalta selitykseltä lämpenemiselle. Tähän malliin yhdistyy usein ajatus saastepäästöistä, jotka muodostavat ilmakehään kerroksen. Näin muodostuu kasvihuonemalli: auringon säteily pääsee esteettä maan pinnalle, mistä se heijastuu. Yläilmakehän päästökerros, ikään kuin kasvihuoneen katto, estää sitten säteilyä poistumasta. Säteily heijastuu takaisin maahan, sitten taas takaisin ilmakehään. Säteily jää näin ”kimpoilemaan” (”bounces back and forth”) maanpinnan ja päästökerroksen väliin (Reinfried ym. 2012). Mielikuviiin vaikuttaa myös opetuksessa ja mediassa käytetty kasvihuoneanalogia ja kasvihuonekaasujen visuaalinen esittäminen printti- ja sähköisissä medioissa. Choi ym. (2010) lisäävät, että kirjoissa ilmastomuutos ja muut ympäristöongelmat käsitellään usein rinnakkain, mikä helposti johtaa niiden sekoittumiseen opiskelijan itselleen muodostamissa tietorakenteissa.

Suomalaiset lukion opetussuunnitelman perusteet noudattelevat edellä kuvattua konstruktivistista oppimiskäsitystä: ”Opetussuunnitelman perusteet pohjautuvat oppimiskäsitykseen, jonka mukaan oppiminen on seurausta opiskelijan aktiivisesta ja tavoitteellisesta toiminnasta, jossa hän vuorovaikutuksessa muiden opiskelijoiden, opettajan ja ympäristön kanssa ja aiempien tietorakenteidensa pohjalta käsittelee ja tulkitsee vastaanottamaansa informaatiota” (Opetushallitus 2003). Opetuksen yleisissä tavoitteissa mainitaan tietoisuuden kehittäminen ihmisten toiminnan vaikutuksesta maailman tilaan, halu ja kyky toimia demokraattisessa yhteiskunnassa vastuullisesti sekä kaikille lukioille yhteisenä aihekokonaisuutena kestävä kehitys. Tavoitteena on, että opiskelija muun muassa ”osaa mitata, arvioida ja analysoida sekä luonnonympäristössä että kulttuuri- ja sosiaalisessa ympäristössä tapahtuvia muutoksia” ja ”pohtii, millainen on kestävä elämäntapa, luontoa pilaamaton ja ekotehokas tuotanto ja yhdyskunta”. Ilmastomuutosta ei kuitenkaan yksilöidä merkittävänä tai

tarkasteltavana muutoksena, ja ohjeistus keskittyy raaka-aineiden ja energian käyttöön (Opetushallitus 2003).

Oppiainekohtaisissa opetussuunnitelman perusteissa ilmastonmuutos mainitaan erikseen vain maantiedon kohdalla. Pakollisen kurssin GE1 (Sininen planeetta) keskeisissä sisällöissä ilmastonmuutos mainitaan kohdassa ”Sää ja ilmasto”, ja syventävässä kurssissa GE3 (Riskien maailma) luonnonvarojen käyttöön liittyvänä riskinä. Fysiikan tai kemian oppiainekohtaisissa perusteissa ilmastonmuutosta ei mainita erikseen (esimerkiksi fysiikan pakollisen kurssin FY1, Fysiikka luonnontieteenä, keskeisen sisällön ”energian, erityisesti säteilyn, sitoutuminen ja vapautuminen luonnon ja ihmisen aikaansaamissa prosesseissa” yhteydessä). Nykyisissä lukion opetussuunnitelman perusteissa ilmastonmuutos mainitaan erikseen maantieteen pakollisen kurssin GE1 (Maailma muutoksessa) sisällöissä (Opetushallitus 2015).

Vuoden 2003 opetussuunnitelman perusteiden mukaisella maantiedon pakollisella kurssilla ainakin kirjat Lukion maantiede 1 (Kakko ym. 2008) ja Globus (Ervasti ym. 2006) käsittelevät ilmastonmuutosta hyvin lyhyesti. Kirjassa Lukion maantiede 1 on luku ”Ilmastot muuttuvat”, jonka kappaleita ovat ”Ilmaston pitkäaikaiset vaihtelut”, ”Jääkausien ja lämpökausien vaihtelu”, Auringon, meteoriittien ja tulivuorten vaikutus ilmastoon”, ”El Niño” ja ”Kasvihuoneilmiön voimistuminen” (tässä järjestyksessä). Kasvihuoneilmiöstä ei ole havainnollistavaa kuvaa.

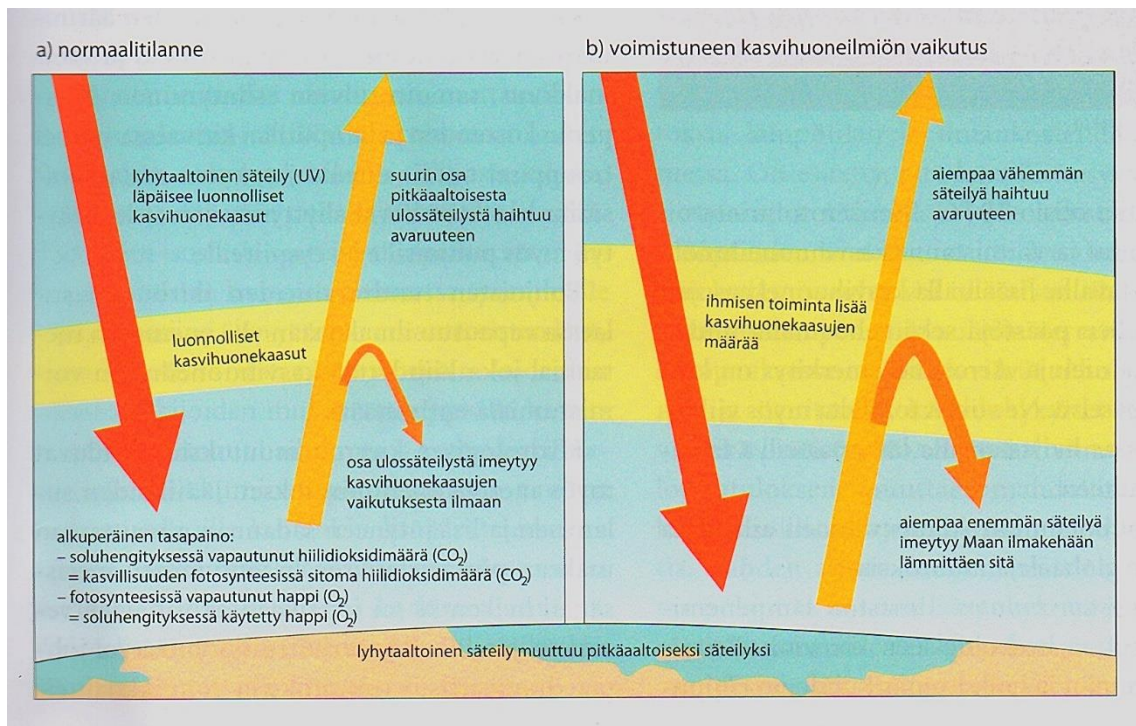
Kirjassa ”Globus” (Ervasti ym. 2006) kasvihuoneilmiö mainitaan ensimmäisen kerran luvun ”Ilmakehä eli atmosfääri” alaluvussa ”Ilmakehän rakenne”. Heti kasvihuonekaasujen esittelyn ja kasvihuoneilmiön voimistumisen perään mainitaan otsonikato ja saastuminen (ilman väliotsikkoo). Ilmastonmuutokseen palataan luvun ”Sää ja ilmasto” alaluvussa ”Onko maapallon ilmasto muuttumassa”. Siinä ilmastonmuutoksen mahdollisiksi syiksi esitetään (tässä järjestyksessä) maapallon kiertoradan elliptisyyden vaihtelut, maapallon pyörimisakselin kaltevuuskulman vaihtelut, maapallon akselin kiertyminen 23 000 vuoden jaksoissa sekä mannerlaattojen liikkeet ja niihin liittyvät vuorten poimutukset. Viereisellä sivulla on tietolaatikkoteksti ”Vuosi vuodelta yhä lämpimämpää”, jossa kerrotaan kasvihuoneilmiön voimistumisesta. Lyhyt- ja pitkäaaltainen säteily mainitaan (osittain kuvatekstissä). Lisäksi kerrotaan, että ilmakehässä olevat kasvihuonekaasut hidastavat lämmön karkaamista avaruuteen. Kuvituskuvassa on pilvi, josta säteilyä palaa maanpinnalle (Kuva 2). Kuvatekstissä

kasvihuonekaasuja verrataan kasvihuoneen lasiseiniin. Otsoni on kuvassa listattu kasvihuonekaasuna, mutta tekstissä tätä ei käsitellä mitenkään.



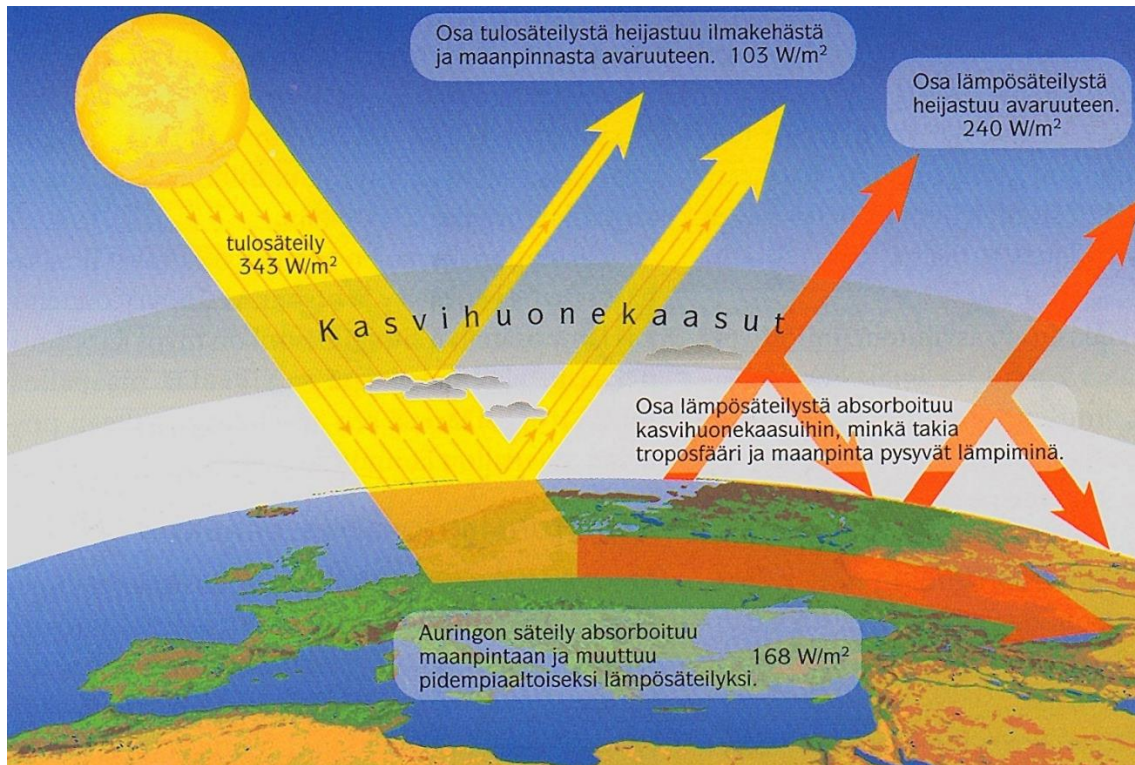
Kuva 2. Kasvihuoneilmiön voimistuminen. Kuvituskuva, Ervasti ym. 2006 (s. 59, käyttö tekijän luvalla)

Syventävän kurssin GE3 (Riskien maailma) oppikirjoista ainakin kahdessa 2010-luvulla käytössä olleessa (GE3, Antikainen ym. 2006 ja Lukion maantiede 3, Fabritius ym. 2008) ilmastonmuutos ja otsonikato esitetään samassa luvussa. Kirjassa GE3 ne ovat Luvun ”Ilmakehän uhkat” peräkkäiset alaluvut ”Ilman rakenne ja koostumus: otsonikato ja ilmansaasteet” ja ”Globaali ilmastonmuutos – kasvihuoneilmiö”. Pitkäaaltainen lähtösäteily mainitaan vain kuvatekstissä, lyhytaaltainen säteily vain kuvassa (Kuva 3). Kasvihuonekaasut ja aerosolit (jotka esitetään yhdessä) on listattu tietolaatikossa. Kasvihuonekaasut mainitaan tekstin yleisessä osassa alussa kerran, toimenpiteiden yhteydessä uudelleen. Teksti (jota on kuusi sivua) keskittyy kasvihuoneilmiön aiheuttamiin globaaleihin muutoksiin.



Kuva 3. Kasvihuoneilmiön voimistuminen. Kuvituskuva, GE3 (Antikainen ym. 2006 s. 47, käyttö tekijän luvalla).

Kirjassa Lukion maantiede 3 (Fabritius ym. 2008) on luku ”Ilmastonmuutos ja otsonikato”, jonka kuudesta alaluvusta viisi käsittelee ilmastonmuutosta, kuudes otsonikatoa. Eri säteilylajit ja niiden lähteet esitellään tekstissä, mutta tekstistä löytyy myös lause ”Osa ilmakehän kaasuista absorboi eli pidättää tämän pidempiaaltoisen säteilyn ja estää näin sen heijastumisen takaisin avaruuteen.” Sanaa ”heijastuminen” käytetään siis ikään kuin palaamisen synonyyminä. Kasvihuonekaasut esitellään tekstissä (niille on omistettu kokonainen alaluku). Kuvituskuvasa kasvihuonekaasut esitetään erillisenä kerroksena (Kuva 4).



Kuva 4. Kasvihuoneilmiö. Kuvituskuva, Lukion maantiede 3 (Fabritius ym. 2008 s. 97, käyttö tekijän luvalla).

3. Ilmastoa muuttavat tekijät

Ilmastolla tarkoitetaan laajahkon alueen sääolojen (lämpötilan, sateen, tuulten, pilvisyyden, ...) yleistä luonnetta (esim. Kielitoimiston sanakirja, climate.gov). Alueen ilmasto- oloihin vaikuttavat muun muassa sen sijainti maapallolla (leveyspiiri), korkeus merenpinnasta, etäisyys valtameristä ja merivirrat. Näiden lisäksi ilmastoa säätelee Auringosta saapuvan säteilyn määrä. Tietyn alueen maantieteellinen sijainti muuttuu hyvin hitaasti (vuosimiljoonien ja -miljardien kuluessa), mutta saapuvan säteilyn määrä ja merivirrat säätelevät ilmastoa myös lyhyemmillä tarkasteluväleillä.

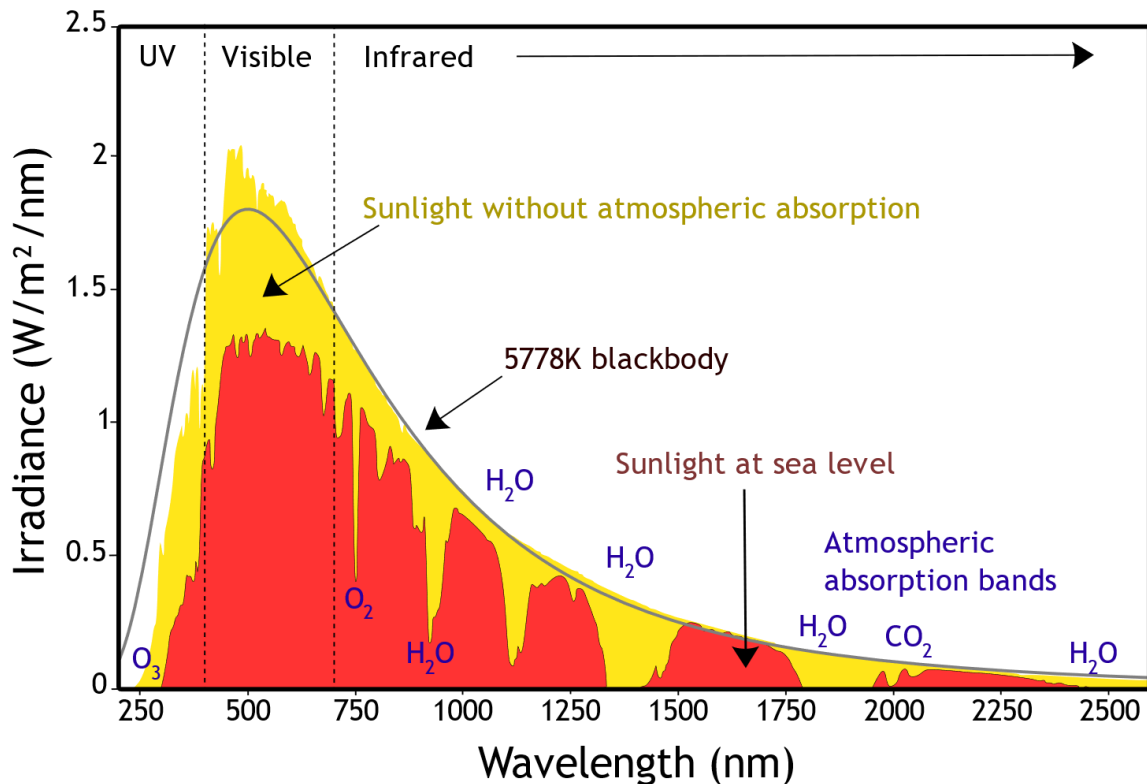
Maapallon ilmakehä on kaasuista koostuva, noin 500 km paksu kerros, jonka ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti korkeuden mukaan. Paine laskee ilmakehässä ylöspäin mentäessä varsin tasaisesti, lämpötila epätasaisemmin. Noin 15 km korkeudella lämpötila alkaa nousta (Caballero 2014). Tämä raja tunnetaan nimellä tropopausi, ja sen alapuolinen ilmakerros on troposfääri, jossa valtaosa sääilmiöistä tapahtuu. Vesihöyrypitoisuus (kosteus) putoaa lähelle nollaa 2–3 km korkeudella (Caballero 2014). Troposfäärin ulkopuolella on stratosfääri (noin 50 km korkeuteen), sen ulkopuolella mesosfääri (85 km korkeuteen) ja termosfääri. Ilmakehän uloin kerros on koostumukseltaan erittäin ohut eksosfääri, jonka ulkopuolella on ilman selkeää rajaa avaruus.

Jotkin ilmakehän yhdisteet (esimerkiksi typpi (N_2), happi (O_2) ja hiilidioksidi (CO_2)) ovat hyvin sekoittuneita. Niiden elinaika ilmakehässä on pitkä, ja ilmakehän virtaukset sekoittavat ne tehokkaasti koko ilmakehään. Niiden osuus ilmakehän molekyyleistä on siis kaikilla korkeuksilla suurin piirtein sama (Caballero 2014). Osa yhdisteistä, tärkeimpänä vesihöyry, esiintyvät ilmakehässä huomattavasti vaihtelevampina osuuksina. Vesi on ainoa ilmakehän yhdiste, joka voi vaihtaa olomuotoa ilmakehälle tyypillisissä lämpö- ja paineoloissa (Caballero 2014). Vettä haihtuu pinnoilta ja kasvillisuudesta, tiivistyy pilvi- ja sadeepisaroiksi ja sataa alas. Nämä prosessit ovat varsin nopeita, ja siksi vesihöyryn viipymisaika ilmakehässä on lyhyt.

3.1 Ilmastoön vaikuttavat luonnolliset tekijät

3.1.1 Maapallon säteilytasapaino

Auringon fuusioreaktioissa vapautunutta energiaa saapuu Maahan sähkömagneettisena säteilyä. Ilmakehän ulkoreunalle saapuvan säteilyn aallonpituusjakauma vastaa Auringon lähettämää säteilyä (Kuva 5).



Kuva 5. Auringosta lähtevän (keltainen alue) ja Maan pinnalle saapuvan (punainen alue) säteilyn aallonpituusjakauma. (Nick84 - File:Solar_spectrum_ita.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24648395>)

Sähkömagneettinen säteily on aaltoliikettä, jonka aallonpituus ja taajuus ovat yhteydessä toisiinsa. Kvanttifysikaalisessa tarkastelussa sähkömagneettista säteilyä ei kuitenkaan ajatella vain aaltolina, vaan myös partikkeleina (aalto-hiukkasdualismi). Sähkömagneettisen säteilyn partikkeleita (kvantteja) kutsutaan fotoneiksi. Fotonin energia (ja myös sen liikemäärä) riippuu fotonin värähtelytaajuudesta.

Molekyylit voivat vuorovaikuttaa säteilyn kanssa kolmella tavalla: absorboitumalla, emittoitumalla tai siroamalla. Absorptiossa fotonin ja molekyylin törmäyksen jälkeen fotonin energia häviää ja sen

energia siirtyy kaasumolekyylin sisäiseksi energiaksi (värähtely- rotaatio- ja sähköiseksi energiaksi), jolloin molekyyli virittyy (Caballero 2014). Koska molekyylin rotaatio- ja värähtelyenergia on kvantittunut, vain tietyt energiasiirtymät ovat mahdollisia. Tämä tarkoittaa, että vain fotonit, joilla on sopiva energia, voivat absorboitua tietynlaiseen molekyyliin (Caballero 2014). Näin syntyy aineelle ominainen absorptiospektri: ne sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet, joita kaasumaisessa olomuodossa oleva aine absorboi säteilyn kulkiessa sen läpi.

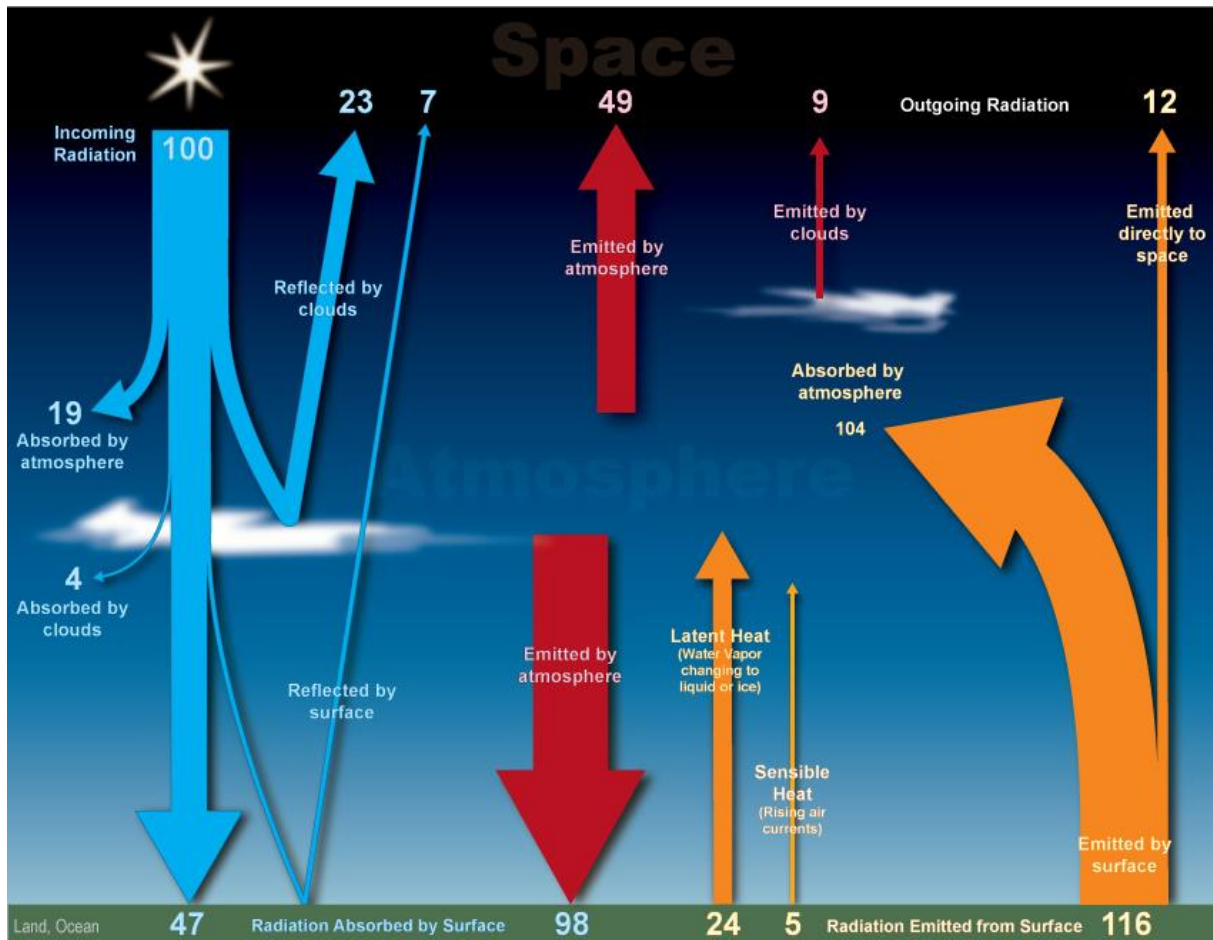
Absorboituminen voi vaikuttaa merkittävästi molekyylin kokonaisenergiaan. Vaikutus kuitenkin riippuu siitä, saako fotoni molekyylin virittymään edellä kuvatulla tavalla. Virittynyt molekyyli törmäilee toisiin molekyyliin, ja näissä törmäyksissä fotonilta peräisin oleva energia vähitellen jakautuu tasaisesti kaasumolekyylien kesken. Yksiatomisilla kaasuilla on vähän sisäisiä vapausasteita, joten niiden säteilylämmittäminen on vaikeaa. Moniatomisessakin kaasussa rotaatio- ja värähtelymoodit yhdistyvät säteilykenttään vain, jos molekyyli on sähköinen tai magneettinen dipoli. Positiivisen ja negatiivisen navan olemassaolo mahdollistaa sen, että sähkömagneettinen säteily saa molekyylin pyörimään tai värähtelemään. Kasvihuonekaasut, kuten hiilidioksidi, vesihöyry, otsoni ja metaani, ovat juuri tällaisia molekyyliä. Kaasun lämpeneminen pitkäaaltoisen säteilyn absorption seurauksena edellyttää myös, että molekyyli ehtii törmätä toiseen ennen kuin fotoni re-emitoituu. Ilmakehässä tämä ehto yleensä toteutuu (Caballero 2014).

Emissio on absorption vastakohta: törmäyksessä virittynyt molekyyli lähettää fotonin. Jos tämä fotoni ei heti absorboidukaan uudelleen, kaasu jäähtyy. Siroamisessa fotoni ja molekyyli kimpoavat törmäyksen seurauksena eri suuntiin kuin biljardipallot. Suurin osa ilmakehän säteilyenergiasta on näkyvän valon ja infrapunasäteilyn taajuuksilla (0,1–100 μm). Fotonien energia ja liikemäärä on tyypillisesti pieni verrattuna molekyylien liikemääriin, minkä vuoksi sironta vaikuttaa lähinnä fotonien etenemissuuntaan (Caballero 2014).

Ilmakehä vaikuttaa siis saapuvaan säteilyyn monella tavalla: osa säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen, osa siroaa eri suuntiin osuessaan ilmakehän molekyyliin, osa absorboituu. Kaiken kaikkiaan ilmakehä läpäisee erittäin huonosti UV-säteilyä ($\lambda < 0,3 \mu\text{m}$) ja infrapunasäteilyä ($\lambda > 4 \mu\text{m}$) lukuun ottamatta väliä 8-14 μm (Caballero 2014). Ilmakehän kaasuilla on kullakin oma absorptiospektrinsä, tietyt aallonpituudet, joita kaasumolekyylit absorboivat. UV-säteilyn absorboi stratosfäärin otsoni (O_3). Infrapunasäteilyn tärkeimmät

absorboijat ovat vesihöyry (H_2O , absorboi kaiken säteilyn aallonpituusvälillä $5\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ ja $>20\text{ }\mu\text{m}$), hiilidioksidi (CO_2 , $14\text{--}16\text{ }\mu\text{m}$), otsoni (UV-säteilyn lisäksi noin $10\text{ }\mu\text{m}$), typpioksiduuli (N_2O , noin $8\text{ }\mu\text{m}$) ja metaani (CH_4 , noin $8\text{ }\mu\text{m}$) (Caballero 2014). Näiden kasvihuonekaasuina tunnettujen kaasujen absorboimat aallonpituudet näkyvät selvästi ”kuoppina” Maan pinnalle saapuvan säteilyn aallonpituusjakaumassa (Kuva 5). Muiden kuin vesihöyryn osalta merkittävää on se, että niiden absorptioaallonpituudet osuvat siihen ikkunaan, jonka vesihöyry päästää läpi.

Huomattava osa Auringon Maan pintaan osuvasta säteilystä osa heijastuu takaisin ilmakehään (Kuva 2). Heijastuvan säteilyn osuus riippuu pinnan albedosta (heijastuskyvystä), joka vaihtelee pinnan ominaisuuksien mukaan välillä $0,14\text{--}0,84$ (tummanvihreä metsäpeite-puhdas jäätikkö) (earthobservatory.nasa.gov). Albedoluvun kuvaama osuus pintaan osuvasta auringon säteilystä heijastuu pois, loppuosa saapuvasta säteilystä absorboituu muun muassa maaperään, kasveihin ja valtameriin. Myös pilvisyys vaikuttaa heijastumiseen, sillä pilvien albedo on varsin korkea. Absorboituneen säteilyn energia vapautuu ennemmin tai myöhemmin ympäristöön lämpösäteilynä, jonka aallonpituus saattaa poiketa huomattavasti absorboituneesta säteilystä. Maan ilmakehään lähettämästä lämpösäteilystä osa heijastuu, osa siroaa ja osa absorboituu samaan tapaan kuin Auringosta saapuvasta säteilystä (Wong 2016). Tilanne poikkeaa kuitenkin merkittävällä tavalla saapuvasta säteilystä, sillä Maasta lähtevän säteilyn spektrissä on huomattavasti suurempi osa lämpösäteilyä kuin saapuvan säteilyn spektrissä. Kasvihuonekaasuilla on ratkaiseva merkitys sen kannalta, kuinka suuri osa Maasta lähtevästä lämpösäteilystä poistuu avaruuteen (Kuva 6).



Kuva 6. Maapallon säteilytase. (www.weather.gov, käyttö tekijän luvalla)

Systeemiin imeytyvän ja takaisin avaruuteen poistuvan sähkömagneettisen säteilyn erotusta kutsutaan Maan säteilytaseeksi, joka voi olla positiivinen (energiaa tulee enemmän kuin poistuu) tai negatiivinen. Taseen muutosta kutsutaan nimellä säteilypakote (radiative forcing). Luontaisia säteilytaseeseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa auringosta saapuvan säteilyn vaihtelu ja tulivuorenpurkaukset.

3.1.2. Maan kiertoradan muutokset

Maan ja Auringon välisen geometrian vaihtelu aiheuttaa vaihtelua Maahan saapuvan säteilyenergian määrässä. Vaikutus Maapallon ilmastoon voi edellä kuvatun säteilytaseen mukaisesti olla huomattava, riippuen saapuvan säteilyn määrän muutosten voimakkuudesta. Milankovitchin teorian mukaan Maan kiertoradan eksentrisyys (elliptisyys) vaihtelee noin 100 000 vuoden sykleissä, akselin kaltevuus noin 41 000 vuoden sykleissä ja akselin prekessio noin 26 000 vuoden sykleissä (Graham 2008).

Kiertoradan eksentrisyys vaikuttaa ilmastoon voimakkaasti, mutta hitaasti (Hays ym. 1976). Eksentrisyyden suhteen Maa on tällä hetkellä lähellä kierron alkua (interglasiaalissa), ja eksentrisyys on pieni (Graham 2008). Akselin kallistuskulma ja prekessio eivät vaikuta maapallolle saapuvan säteilyn määrään, mutta niillä on vaikutusta vuodenaikojen voimakkuuteen ja niiden välisiin kontrasteihin (Wong 2016).

3.1.3 Auringon aktiivisuus

Auringonpilkkujen keskimäärin 11-vuotinen sykli havaittiin jo vuonna 1843 (Hathaway 2015). Auringonpilkut syntyvät Auringon magneetikentän muuttuessa ja kuvastavat näin Auringon aktiivisuutta. Myöhemmin havaittiin yhteys auringonpilkkujen ja ilmaston välillä: vuosien 1645–1715 välinen auringonpilkkujen vähäisyys tunnetaan Maunderin miniminä (Eddy 1976), ja se osuu ajallisesti yhteen ”pienen jääkauden” kanssa. Tuolloin ilmasto-olosuhteet vaihtelivat voimakkaasti eri puolilla maapalloa, ja Euroopassa koettiin useita epätavallisen kylmiä jaksoja (Mann 2002).

Auringon aktiivisuuden vaihtelu vaikuttaa sekä Maahan saapuvan kokonaissäteilyn määrään että säteilyn spektriin: auringonpilkkumaksimin aikana UV-säteily lisääntyy (Wong 2016). Tästä seuraa ilmakehän keskikerroksen otsonin lisääntyminen, mikä otsonin kasvihuonekaasuvaikutuksen (ks. jäljempänä) vuoksi lämmittää ilmakehää (Hoyt ja Schatten 1997). Tämänhetkinen auringonpilkkusykli (sykli 24) oli maksimissaan vuonna 2014 (Hathaway 2015). Seuraavaa minimiä ennustetaan vuoden 2019 lopulle tai vuoden 2020 alkuun (www.weather.gov).

3.1.4 Tulivuorenpurkaukset

Tulivuorenpurkaukset vaikuttavat ilmastoon merkittävästi sekä lyhyillä että pidemmällä, jopa vuosien tarkastelujaksoilla. Suuri tulivuorenpurkaus syöksee purkauskaasuja ja kiinteitä hiukkasia stratosfääriin saakka (Robock 2000). Tuhkapartikkelit putoavat verrattain nopeasti, ja vaikka vesihöyryä ja hiilidioksidia on purkaustuotteissa runsaasti, niiden pitoisuudet ilmakehässä ovat niin korkeat, ettei suurikaan tulivuorenpurkaus sanottavasti vaikuta tilanteeseen.

Merkittävin purkauskaasuista on rikkidioksidi (SO_2), josta muodostuvat aerosolit vaikuttavat ilmastoon noin vuoden ajan (Robock 2000). Yläilmakehän virtausten mukana ne leviävät laajalle alueelle, jolloin vaikutuksetkin voivat olla globaaleja. Aerosolit toisaalta heijastavat Auringon säteilyä ja viilentävät näin maanpintaa, toisaalta absorboivat säteilyä ja lämmittävät stratosfääriä (Bethke ym. 2017). Lisäksi tulivuoriperäiset aerosolit muodostavat heterogeenisille, stratosfäärin otsonia tuhoaville reaktioille sopivia pintoja (Robock 2000). Tulivuorenpurkaukset olivat osallisena ”pienenä jääkautena” tunnettuun ilmastomuutokseen (Bethke ym. 2017). Suorien vaikutusten lisäksi tulivuorenpurkauksilla saattaa olla monenlaisia epäsuoria vaikutuksia ja yhteyksiä muihin ilmastoon vaikuttaviin tekijöihin (Robock 2000), mikä tekee mallintamisesta hyvin vaikeaa.

3.1.5 Valtamerten kierrot

Atlantin termohaliinikierto (AMOC)

Atlantin termohaliinikierto (Atlantic meridional overturning circulation, AMOC) koostuu valtamerien pinta- ja syvien vesien virtauksista, jotka kuljettavat lämmintä, suolaista vettä päiväntasaajalta pohjoiseen (Golfvirta) ja toisaalta kylmempää vettä etelään (Williamson ym. 2018). Virtaukset sekoittuvat Pohjan- ja Labradorinmeren alueella ja toisaalta eteläisen pallonpuoliskon merialueilla. Virtaukset johtuvat sekä veden (lämpötilasta ja suolaisuudesta johtuvista) tiheyseroista että ilmakehän ilmiöistä, kuten tuulista.

Pintalämpötilan ja ilmanpaineen vaihtelut Tyynellä valtamerellä

Tavallisesti päiväntasaajan tienoilla puhalttaa itätuuli, joka tuo lämmintä vettä Tyynen valtameren länsiosiin. Itäosassa olot ovat viileämmät. Lämmin merivesi nostaa ilmakehään lämpöä ja kosteutta, mikä johtaa pilvien, sateiden ja myrskyjen muodostumiseen. Konvektion vuoksi kuivaa ilmaa liikkuu valtameren itäosiin. Tuulet heikkenevät ja voimistuvat keskimäärin 3–5 vuoden jaksoissa, mikä vaikuttaa lämpimän veden alueen laajuuteen. Tämä vaihtelu aiheuttaa ilmiön, joka tunnetaan nimellä El Niño, sekä sille vastakkaisen La Niñan. Ilmiöön liittyy ilmanpaineen vaihtelua (eteläinen oskillaatio, southern oscillation SO), ja kokonaisuus tunnetaan nimellä ENSO. El Niño -episodi kestää yleensä 9–12 kuukautta, ja sen aikana olot muuttuvat kosteammiksi ja myrskyisemmiksi Etelä-Amerikan rannikolla. La Niñan aikana puolestaan lämmin vesi pakkautuu valtameren länsiosiin, mikä tarkoittaa myrskyisiä oloja

Australiassa ja kuivuutta Etelä-Amerikassa. Voimakkaan El Niñon vaikutukset ovat maailmanlaajuisia.

Toinen Tyynellä valtamerellä vaikutta ilmiö, Tyynen valtameren oskillaatio (pacific decadal oscillation, PDO), kuvaa meriveden lämpötilan vaihtelua 20–30 vuoden syklillä (www.ncdc.noaa.gov). Vaihtelun vaikutukset ovat samankaltaiset kuin ENSOlla, ja näillä kahdella syklillä on myös yhteisvaikutuksia.

Pintalämpötilan ja ilmanpaineen vaihtelut Atlantilla

Atlantin alueella havaitaan samantapaisia meriveden pintalämpötilan ja ilmanpaineen vaihteluita kuin Tyynellä valtamerelläkin. Pohjois-Atlantin oskillaatio (North Atlantic Oscillation, NAO) kuvaa ilmanpaineen vaihteluita Pohjois-Atlantin eri osien välillä (Wong 2016). Nämä vaihtelut vaikuttavat koko pohjoisen pallonpuoliskon säihin. NAOlla ei tunneta varsinaista sykliä, mutta sen vaihe muuttuu yleensä ainakin kerran vuosikymmenessä (www.cpc.ncep.coaa.gov).

Arktinen oskillaatio (Arctic Oscillation, AO) puolestaan kuvaa arktisen alueen ja valtamerien pohjoisosien välistä ilmanpaineen eroa ja sen normaalia vaihtelua. Vaihtelu tapahtuu päivien tai kuukausien ajanjaksolla, ja AO kuvaakin paremmin lyhytaikaisia sääoloja kuin ilmastoa (Wong 2016).

Kolmas Atlantin alueella vaikuttava ilmiö on Atlantin oskillaatio (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO), jonka jakso on nimensä mukaisesti 24–40 vuotta (Wong 2016). AMO kuvaa veden ja lämmön kiertokulun muutoksia Atlantilla. Lämpimässä jaksossa kosteaa ilmaa siirtyy pohjoiseen ja länsituulet voimistuvat. Tämän seurauksena sateet heikkenevät Pohjois-Amerikassa, ja toisaalta Luoteis-Euroopassa ja Sahelin alueella Afrikassa syntyy enemmän sateita ja myrskyjä (Knight ym. 2006).

3.1.6 Kasvihuoneilmiö

Tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO_2), vesihöyry (H_2O), metaani (CH_4), typpioksiduuli (ilokaasu, N_2O) ja alailmakehän otsoni (O_3). Ne kaikki ovat vähintään kolmiatomisia molekyyliä, joiden geometria on taipunut. Ne muodostavat siis edellä kuvatun

dipolin, jonka muoto mahdollistaa enemmän vapausasteita, ja siten ne voivat virittyä pienemmällä energialla kuin viivamainen molekyyli (Wong 2016). Infrapunasäteilyn energia on pienempi kuin näkyvän valon (saati UV-säteilyn), ja siksi kasvihuonekaasujen rooli on merkittävä nimenomaan infrapunasäteilyn absorptiossa. Toisaalta esimerkiksi happimolekyylin (O_2) kaksi happiatomia asettuvat väistämättä samalle kuvitteelliselle ”viivalle”; dipolia ei näin ollen muodostu.

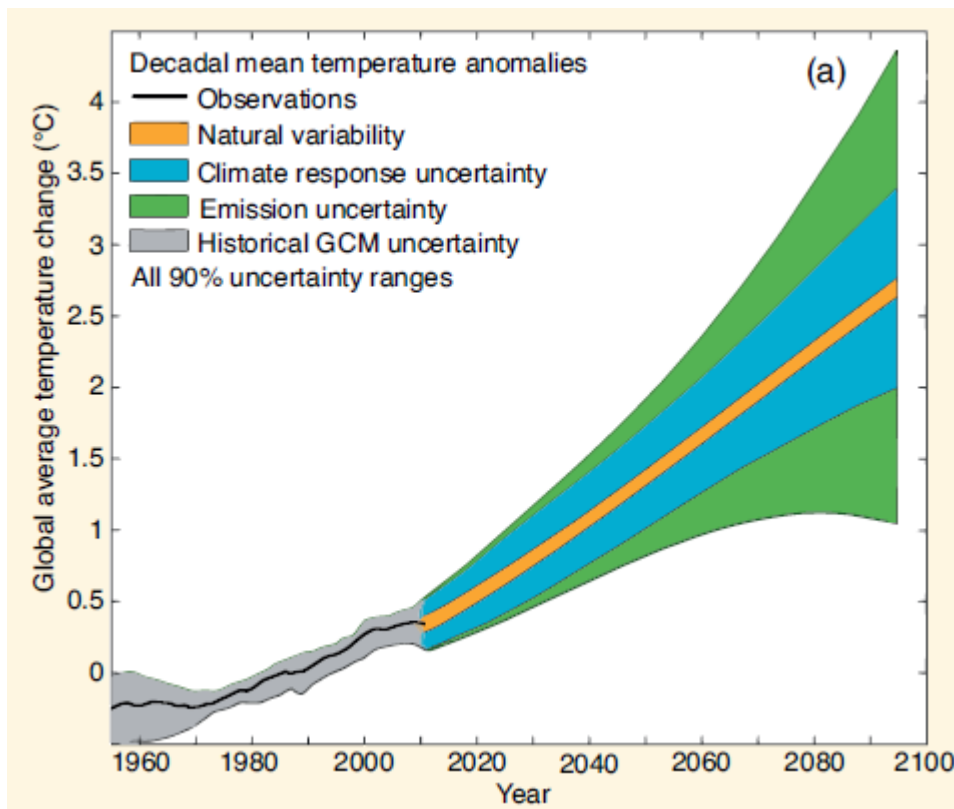
Kasvihuonekaasut absorboivat luonnollisesti sekä Auringosta saapuvaa että Maasta lähtevää lämpösäteilyä ja re-emittoivat sitä kaikkiin suuntiin ympärilleen. Osa Auringosta saapuvasta säteilystä emittoituu siis takaisin kohti avaruutta. Maapallon ilmaston kannalta merkitystä on kuitenkin erityisesti sillä, että Maasta lähtevä lämpösäteily absorboituu kasvihuonekaasumolekyyliin ja re-emittoituu kaikkiin suuntiin, myös takaisin kohti Maata. Absorption seurauksena ilmakehä lämpenee, kun vähemmän energiaa poistuu avaruuteen. Ilman luontaista kasvihuoneilmiötä Maan ilmasto olisi noin 30 °C kylmempi, eikä nykyisenkaltainen elämä olisi planeetalla mahdollista (Caballero 2014).

Kasvihuonekaasuista hiilidioksidi on kemiallisesti varsin vakaa, eikä reagoi herkästi minkään muun yhdisteen kanssa. Ilmakehään vapautunut hiilidioksidi pysyykin siellä satoja vuosia (Wong 2016). Hiilidioksidi jakautuu ilmakehään tasaisesti. Vesihöyry puolestaan kertyy ilmakehän alaosiin ja poistuu ilmakehästä nopeammin, päivien aikana (Wong 2016). Otsonin keskimääräinen elinikä ilmakehässä on pari viikkoa (IPCC 2013) ja metaanin noin 12 vuotta (Wong 2016).

3.2 Ilmastonmuutos

Kaikki toisenvaraisten eliöiden toiminta lisää lämpöä ympäristöön, koska niiden elintoiminnot vapauttavat yhteyttävien eliöiden Auringon energiasta sitomaa energiaa. Lisäksi ihmistoiminta tuottaa lämpöä erilaisten rakennettujen koneiden välityksellä. Tämäkin lämpö on (geotermistä energiaa lukuun ottamatta) suoraan tai välillisesti peräisin Auringosta.

Ilmasto muuttuu ja on muuttunut aina, ja luonnolliset muutokset ovat aiheuttaneet muun muassa jääkausia. Teollisen aikakauden alettua muutos on kuitenkin ollut ennennäkemättömän nopeaa 1800-luvulta alkaen. Seurantamittauksissa lämpeneminen on ollut selvästi havaittavissa 1960-luvulta asti (Kuva 7).



Kuva 7. Keskilämpötilan kehitys 1960-luvulta ja ennuste vuoteen 2100. (IPCC 2013)

3.2.1 Luonnollisten tekijöiden vaikutus

Vaikka Maan kiertoradan eksentrisyyden vaihtelu vaikuttaa huomattavasti ilmastoon, sen 100 000-vuotisella syklillä ei ole merkitystä havaittujen muutosten kannalta (Graham 2008). Maan akselin kallistuskulma ja prekessio eivät vaikuta maapallolle saapuvan säteilyn kokonaismäärään, mutta vuodenaikojen voimakkuudella ja niiden välisillä kontrasteilla saattaa olla vaikutusta ilmastoon (Wong 2016). Esimerkiksi akselin kallistuskulman kasvaessa talvet ovat viileämpiä ja kesät lämpimämpiä. Viileän talven myötä kasvavan lumipeitteen albedo on suuri, jolloin saapuvasta säteilystä entistä suurempi osa heijastuu takaisin avaruuteen, mikä viilentää ilmastoa entisestään (Graham 2008).

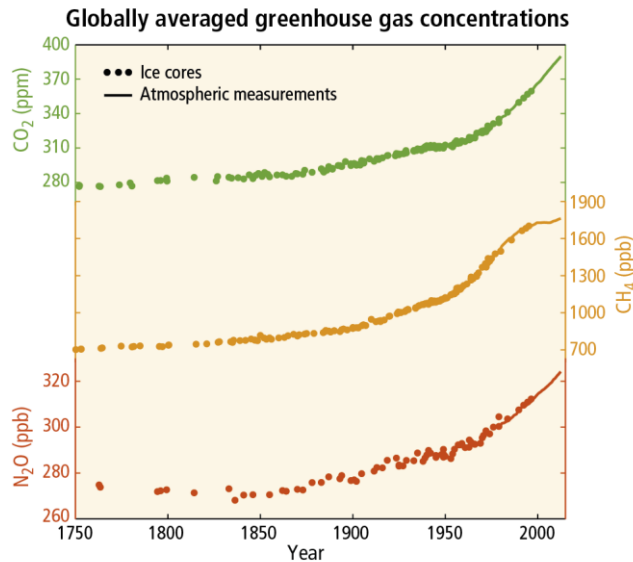
Pitkällä aikavälillä vaikuttava kiertoradan eksentrisyys on interglasiaalivaiheessa, mutta auringonpilkkuusykli hiljaisessa vaiheessa (Wong 2016). Valtamerisykleistä ENSO ja NAO kuvaavat vain lyhyemmän aikavälin alueellista ja paikallista vaihtelua. PDO ja AMO, joiden sykli on pidempi, ovat molemmat lämpimässä vaiheessa (www.ncdc.noaa.gov, stateoftheocean.osmc.noaa.gov). Näiden syklien syntyä ei tunneta, joten niiden roolia

ilmastonmuutoksessa on vaikea arvioida (Wong 2016). Yleisesti ottaen on epätodennäköistä, että mitkään näistä sykleistä selittäisivät havaittua lämpenemistrendiä (Wong 2016). Tyynen valtameren syklit saattavat kuitenkin ajoittain hidastaa tai nopeuttaa ilmastonmuutosta: vuosina 1994-2014 havaittu lämpenemisen hidastuminen johtui todennäköisesti ENSOn, PDO:n, aurinkosyklin ja tulivuorenpurkausten yhteisvaikutuksesta (www.climate.gov). Atlantin termohaliini kierron arvioidaan heikentyvän 2000-luvulla, mutta äkkinäinen romahdus ("Golfvirran pysähtyminen") on hyvin epätodennäköinen tapahtuma (IPCC 2013). Ilmastonmuutoksen seurauksena lisääntyneen kosteuden takia ENSOn synnyttämät sateiden vaihtelut todennäköisesti kasvavat (IPCC 2013).

Jäätiköiden ja lumipeitteen albedo on korkea, joten ne heijastavat suuren osan saapuvasta säteilystä takaisin avaruuteen. Lämpötilan noustessa jäätiköt kuitenkin sulavat ja lumipeitteinen aika lyhenee. Paljastuvan maanpinnan albedo on huomattavasti pienempi. Entistä suurempi osa saapuvasta säteilystä siis absorboituu maanpintaan. Toisaalta ilmakehän vesihöyrypitoisuuden kasvun myötä lisääntyvä pilvisyys saattaisi kasvattaa pilvistä ulosheijastuvan säteilyn osuutta. Pilvisyyden lisääntymisestä ei globaalilla tasolla ole luotettavaa tietoa (IPCC 2013).

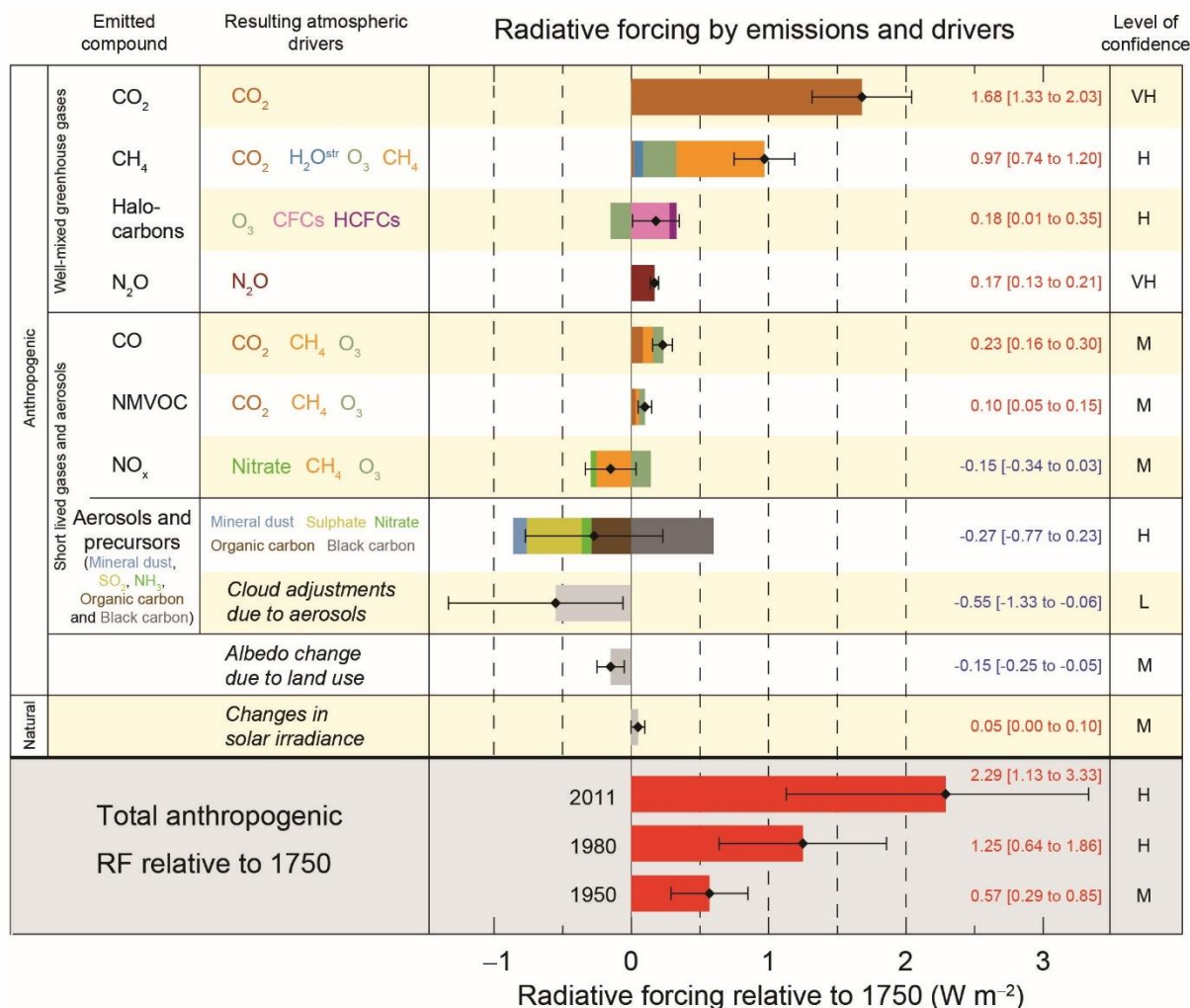
3.2.2 Voimistuneen kasvihuoneilmiön vaikutus

Esiteollisena aikana ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli noin 280 ppm (Kuva 8). Fossiilisten polttoaineiden käytön lisääntyminen on kuitenkin kasvattanut ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta noin 40 % (IPCC 2013). Metaanin ja typpioksiduulin pitoisuudet ovat kasvaneet vielä voimakkaammin (Kuva 8). Tästä on seurannut ilmakehän ja sen seurauksena myös merien ja maa-alueiden lämpenemistä (IPCC 2013).



Kuva 8. Kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä jääkairauten ja suorien mittausten perusteella (IPCC 2014).

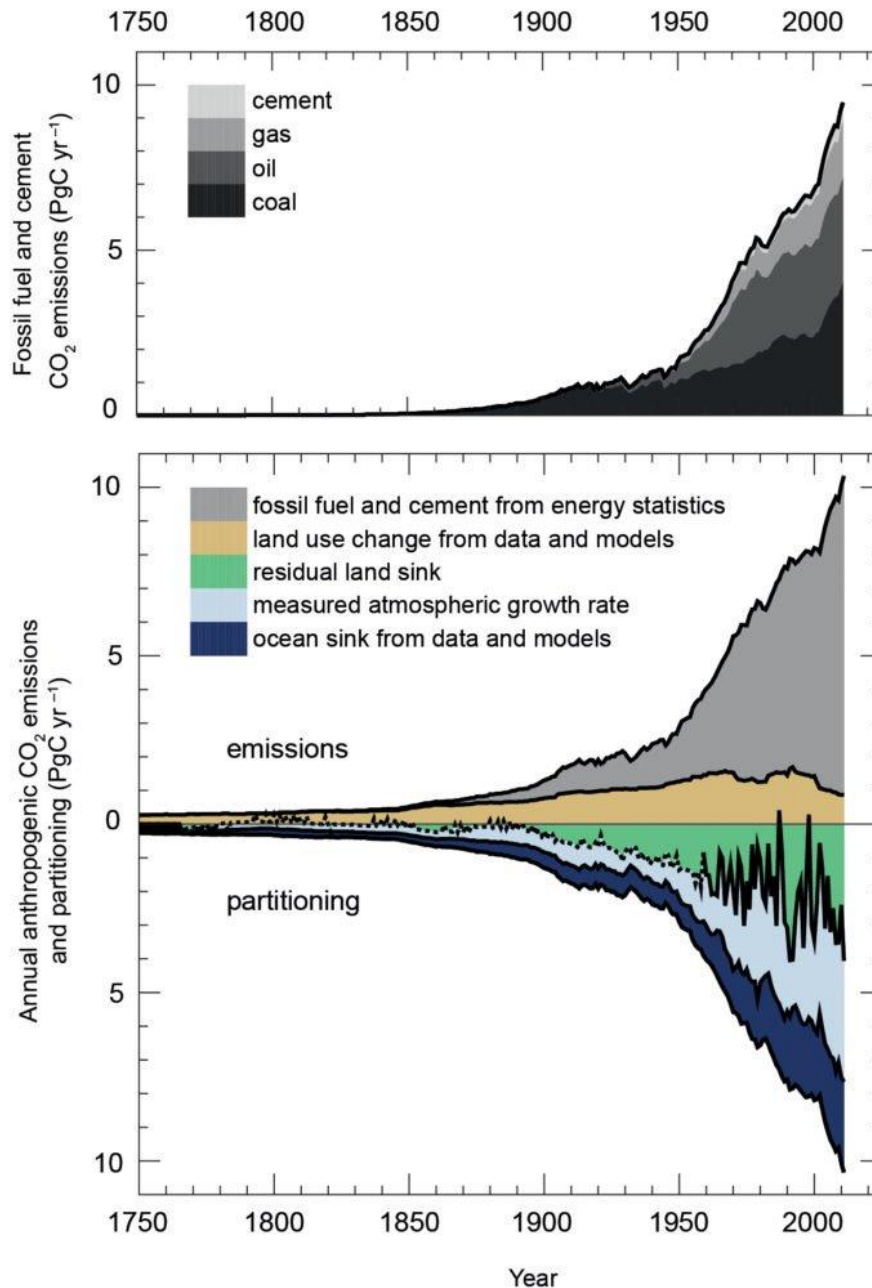
Kasvihuonekaasujen pitoisuuksien noustessa entistä suurempi osa Maan lähettämästä lämpösäteilystä absorboituu ilmakehään, joka lämpenee ja lämmittää edelleen maanpintaa ja meriä. IPCC:n raportin (2013) mukaan viimeiset kolme vuosikymmentä ovat olleet peräjälkeen lämpimin vuosikymmen sitten 1850-luvun, ja suurin osa ilmastosteemiin varastoituvasta energiasta kertyy valtameriin. Säteilytase on ollut positiivinen (energiaa kertyy ilmastosteemiin) ainakin vuodesta 1970, ja suurin vaikuttava tekijä on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu (Kuva 9, IPCC 2013). Lämpenemisen seurauksena vesihöyryn pitoisuus ilmakehässä on kasvanut vuodesta 1970, mikä voimistaa kasvihuoneilmiötä edelleen. Ilmakehässä olevan energian lisääntyessä myös sääilmiöitä ruokkivaa energiaa on entistä enemmän, mikä saattaa voimistaa esimerkiksi hirmumyrskyjä. Äärimmäiset sääilmiöt ovat lisääntyneet noin vuodesta 1950 alkaen (IPCC 2013).



Kuva 9. Ilmastonmuutoksen kannalta merkittävimpien tekijöiden säteilypakotearviot (W/m²) vuonna 2011 verrattuna vuoteen 1750 (IPCC 2013).

CO₂ ilmakehässä

Maan ilmakehässä on ollut hiilidioksidia sen muodostumisesta lähtien. Kasvit ja muut yhteyttävät eliöt sitovat ilmakehän hiilidioksidia kiinteiksi hiiliyhdisteiksi yhteyttäessään. Tämä hiili kiertää ekosysteemeissä ja vapautuu lopulta takaisin ilmakehään hengityksen tai elollisen aineksen hajoamisen tuloksena. Ennen teollista aikakautta Maan hiilenkierto oli kutakuinkin tasapainossa: hiiltä sitoutui ja vapautui saman verran (IPCC 2013). 1800-luvulta alkaen ihmisten toiminta on kuitenkin kiihdyttänyt hiilidioksidin vapautumista. Ilmastonmuutokseen liitetty hiilidioksidilisä on pääosin peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja maankäytön muutoksista (Kuva 10).



Kuva 10. Vuotuiset ihmistoiminnan aiheuttamat CO₂-päästöt ja niiden jakautuminen ilmakehään, maahan ja valtameriin (IPCC 2013).

Ihmistoiminnan vuoksi kasvanut ilman hiilidioksidipitoisuus kiihdyttää kasvien yhteyttämistä ja hiilensidontaa, millä on ilmastonmuutosta hidastava vaikutus (IPCC 2013, Kuvat 9 ja 10). Tärkein hiiltä sitova ekosysteemi ovat metsät. Hiilensidonta lisääntyy kuitenkin vain tiettyyn rajaan asti, ja lämpötilan noustessa myös kasvien oma hengitys kiihtyy, jolloin osa sidotusta hiilestä vapautuu uudelleen hiilidioksidina. Lisäksi muuttuvat lämpötila- ja sadeolot saattavat

heikentää kasvien elinkykyä (IPCC 2014). Toisaalta kasvien vedenkäytön tehokkuus paranee (transpiraatio pienenee), kun hiilidioksidia on helpommin saatavilla (IPCC 2013).

Hiilidioksidin vesiliukoisuus on 25 °C lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa noin 1,45 g/l. Ilmassa olevaa hiilidioksidia liukenee sekä sadeveteen että meriin ja makeisiin vesiin, joiden pH näin laskee (IPCC 2013, Kuva 10). Tällä happamoitumisella on vaikutusta meriekosysteemeihin. Hiilidioksidi laskee myös sadeveden pH:ta, mutta ”happosateiden” kannalta sillä ei ole merkitystä. Hiilidioksidi on heikko happo, ja sen vaikutuksesta sadeveden luontainen pH on 5,6 (ilmatieteenlaitos.fi). Happosateita aiheuttavat rikki- ja typpioksidipäästöistä syntyvät vahvat rikki- ja typpihapot, jotka ovat pahimmillaan laskeneet sadeveden pH:n lähelle kahta (Likens ja Bormann 1974).

Otsonin rooli ilmastomuutoksessa

Otsoni on merkittävä kasvihuonekaasu vain alailmakehässä. Yläilmakehän otsoni esiintyy niin korkealla, ettei lämpösäteily edusta kovin suurta osaa sähkömagneettisesta säteilystä. Alailmakehän otsoni on peräisin erilaisista polttoprosesseista, vähäisemmässä määrin muun muassa salamaniskuista. Yläilmakehässä oleva otsoni muodostaa ilmakehän ulko-osiin kerroksen, joka absorboi Auringosta saapuvaa UV-säteilyä ja suojaa näin Maapallon eliöitä sen haitallisilta vaikutuksilta. Kemiaalisesti vakaana yhdisteenä hiilidioksidi ei suoraan vaikuta otsonikerrokseen.

Otsonia vapautuu troposfääriin valokemiallisissa reaktioissa, joiden lähtöaineita vapautuu niin luonnon kuin ihmistoiminnankin prosesseissa. Troposfäärin otsonipitoisuuden kasvu liittyy etenkin metaanin, typen oksidien, hiilimonoksidin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen kasvuun (IPCC 2013). Otsonilla on haitallisia vaikutuksia kasveihin, mikä saattaa heikentää niiden kykyä sitoa ilmakehän hiilidioksidia (Fowler ym. 2009). Otsonin pitoisuus troposfäärissä on tasoittunut tai kääntynyt laskuun Euroopassa ja USA:n itäosissa, mutta Aasiassa pitoisuus kasvaa edelleen (IPCC 2013).

Yläilmakehän otsonikerroksen on sen sijaan havaittu ohentuneen muun muassa ilmakehään päästettyjen CFC-yhdisteiden vaikutuksesta. Ohentunut otsonikerros päästää lävitseen entistä enemmän UV-säteilyä, mutta tämän säteilyn suhteellinen merkitys Maan lämpenemisessä on pieni (IPCC 2013).

Otsonikatoa on havaittu etenkin napa-alueilla. Napa-alueiden erittäin kylmän stratosfäärin vesihöyry, typpihappoaerosolit ja ihmistoiminnan tuottama kloori tuhoavat otsonia, ja aiheuttavat niin kutsutun otsoniaukon (IPCC 2013). Reaktionopeus riippuu UV-säteilystä ja lämpötilasta, mutta myös sopivista reaktiopinnoista, joita syntyy luontaisesti esimerkiksi tulivuorenpurkausten aerosoleista (Robock 2000). Otsonia tuhoavien yhdisteiden päästöjä sovittiin rajoitettavan Montrealin pöytäkirjalla vuonna 1987. Niiden pitoisuudet ovatkin pudonneet selvästi (IPCC 2013). Onkin odotettavissa, että tulivuorenpurkausten aiheuttama otsonikato vähenee, koska tulivuoriperäiset aerosolit eivät sitä aiheuta ilman klooriyhdisteitä (Robock 2000).

Vesihöyry

Vesihöyry on voimakas kasvihuonekaasu. Koska kylläisen höyryn pitoisuus on sitä suurempi, mitä lämpimämpää ilma on, ilmaston lämpeneminen nostaa teoriassa ilmakehän vesihöyrypitoisuutta. Lisäksi korkeampi lämpötila lisää haihduntaa, vaikka kasvien kautta tapahtuva transpiraatio toisaalta pienenee, kun hiilidioksidia on helpommin tarjolla (IPCC 2013). Havainnot tukevat teoriaa (IPCC 2013). Haihtuneesta vesihöyrystä valtaosa jää troposfääriin, tiivistyy pilviksi ja sataa takaisin pinnalle. Pilvien muodostuksella on huomattava vaikutus ilmastoon, koska ne estävät sekä auringon säteilyn pääsyä maanpinnalle että lämmön poistumista.

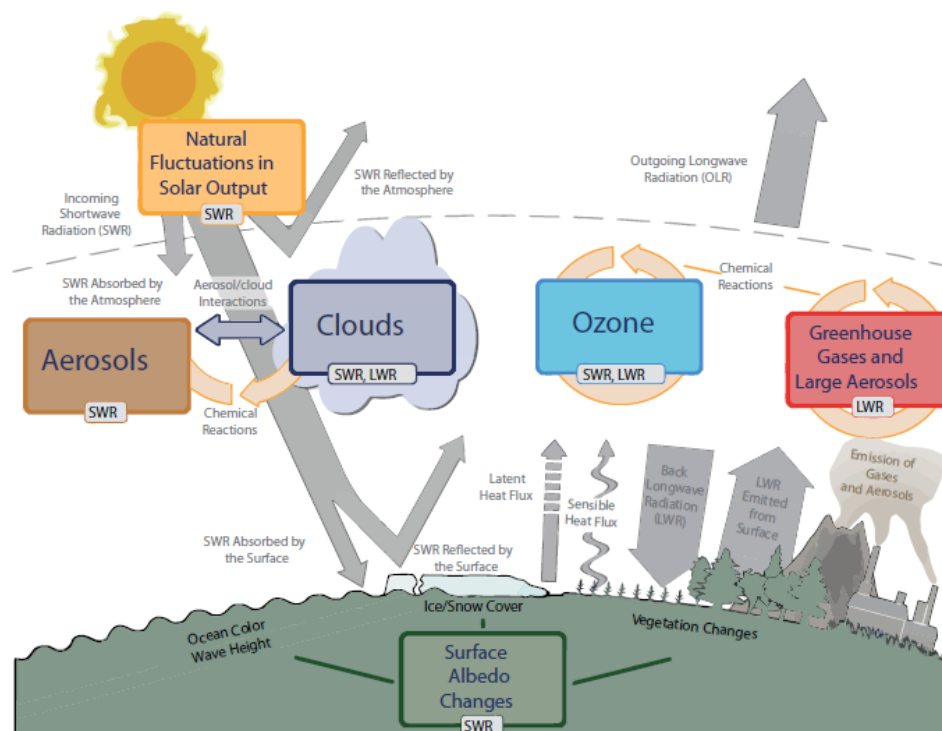
Osa vesihöyrystä karkaa kuitenkin stratosfääriin (Ravishankara 2012). Myös metaanin hapettuminen tuottaa stratosfääriin vesihöyryä. Stratosfäärinen vesihöyry viilentää troposfääriä, mutta lämmittää stratosfääriä. Lisäksi sillä on merkitystä otsonikadon aiheuttajana (IPCC 2013).

Metaani

Metaanin pitoisuus on 2,5-kertaistunut teollisella ajalla (IPCC 2013). Tärkeimpiä ihmistoiminnan aiheuttamia lähteitä ovat karjankasvatus, riisipellot ja kaatopaikat sekä fossiilisten polttoaineiden hankinta ja käyttö. Luontaisesti metaania syntyy hapettoman hajoamisen tuloksena muun muassa märehitijöiden ruuansulatuksessa ja turvemailla. Ilmasto vaikuttaa voimakkaasti metaanin vapautumiseen turvemailta. Ilmaston lämpeneminen saattaisikin lisätä Aaktisen alueen päästöjä, jos metaania vapautuu ikeroudassa olleesta maasta

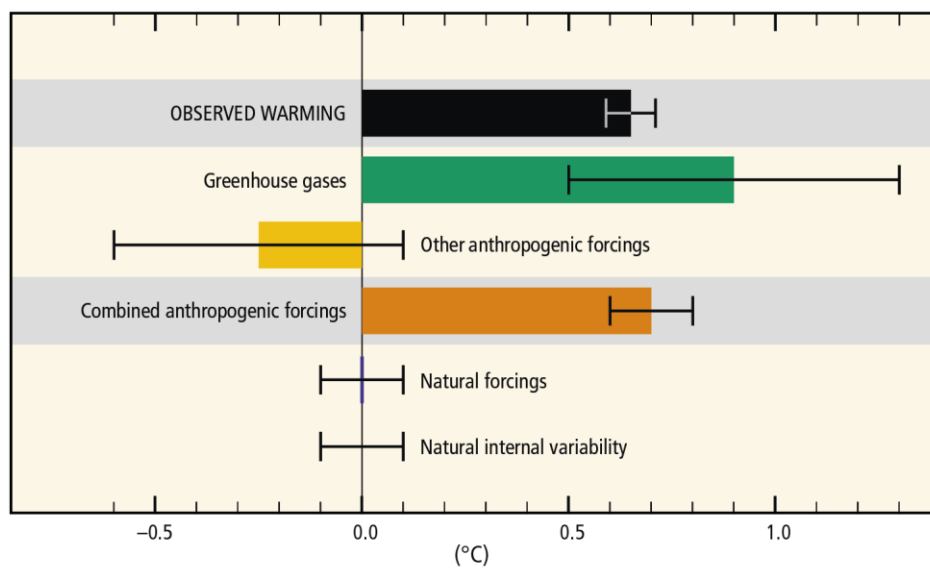
ja matalien merialueiden metaanihydraateista. Toisaiseksi tällaisesta ei ole selviä merkkejä (IPCC 2013).

Ilmasto on ainakin mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä on siis paljon. Suorien vaikutusten lisäksi epäsuorat vaikutukset ja erilaiset takaisinkytkennät tekevät systeemistä erittäin monimutkaisen ja vaikean sekä tutkia että ymmärtää (Kuva 11). On kuitenkin selvää, että havaitun ilmastonmuutoksen taustatekijöistä ihmistoiminta on ehdottomasti merkittävin (kuva 12).



Kuva 11. Ilmastonmuutoksen tärkeimmät tekijät ja niiden väliset yhteydet (IPCC 2013).

Contributions to observed surface temperature change over the period 1951–2010



Kuva 12. Havaittuun lämpenemiseen vaikuttavien tekijöiden merkitys (IPCC 2014).

3.3 Käsitukset ilmastonmuutoksesta

Koululaisten ja opiskelijoiden käsityksiä ilmastonmuutoksesta on tutkittu varsin paljon eri puolilla maailmaa (Taulukko 1). Ajasta, paikasta ja kouluasteesta (yläkoulusta yliopistoon) riippumatta esiin nousevat samat virhekäsitykset. Hiilidioksidiin tai yleisemmin kasvihuonekaasuihin liittyviä yleisiä virhekäsityksiä on koottu Taulukkoon 2.

Taulukko 1. Tutkimuksia oppilaiden ja opiskelijoiden ilmastonmuutokseen liittyvistä käsityksistä.

Tekijä(t)	Vuosi	Maa	Kouluaste	Tutkimustapa	n
Andersson ja Wallin	2000	Ruotsi	Luokat 9 ja 12 (sekä lukio että ammattikoulu)	Kysely, monivalinta +avoimet kysymykset	423
Boon	2009	Australia /UK	Luokat 8-10	Kysely, monivalinta +avoimet kysymykset	740
Boyes ym.	1993	USA	Luokat 5-10	Kysely, väitteet	702
Chang ja Pascua	2016	Singapore	Luokat 8-9	Kysely + haastattelut	27
Gautier ym.	2006	USA	Yliopisto	Testit ennen kurssia ja sen jälkeen, avoimet kysymykset	8
Rebich ja Gautier	2005	USA	Yliopisto	Käsitekarttojen analyysi ennen kurssia ja sen jälkeen	17
Varela ym.	2018	Espanja	Luokka 7	Kysely ennen opetusta ja sen jälkeen, avoimet	40
Wachholtz ym.	2014	USA	Yliopisto	Kysely, monivalinta	338

Tehdyistä tutkimuksista (Taulukko 1) valtaosa keskittyy nimenomaan virheellisten käsitysten tarkasteluun. Opiskelijoiden mahdolliset oikeat käsitykset jäävät näin hämärän peittoon. Virhekäsityksistä yleisimpänä nousee niin sanottu otsoniaukkoteoria (Reinfried ym. 2012): käsitys siitä, että ilmaston lämpeneminen johtuu otsonikerroksen ohenemisesta tai siinä olevista rei'istä. Tämä virhekäsitys nousi esiin kaikissa tarkastelluissa seitsemässä tutkimuksessa (Taulukko 2). Usein tähän liittyi ajatus siitä, että hiilidioksidi (tai yleisemmin kasvihuonekaasut) tuhoavat tavalla tai toisella otsonikerrosta (esim. Boon 2009).

Taulukko 2. Oppilaiden ja opiskelijoiden kasvihuonekaasuihin liittyviä käsityksiä.

Tekijä(t)	Andersson ja Wallin 2000	Boon 2009	Boyes ym. 1993	Chang ja Pascua 2016	Gautier ym. 2006	Rebich ja Gautier 2005	Varela ym. 2018	Wachholtz ym. 2014
Lämpeneminen ymmärretään (kasvihuonekaasuista johtuvan) otsonikadon seuraukseksi	x	x	x	x		x	x	x
Lämpeneminen sekoittuu otsonikadon lisäksi myös esim. happosateisiin			x	x			x	
(Heijastunut) säteily jää kasvihuonekaasujen takia loukkuun			x			x		
Lämpö ei pääse ulos tai kimpoaa takaisin hiilidioksidin takia	x	x						
Kasvihuonekaasut jäävät loukkuun		x				x		
Kasvihuonekaasut heijastavat säteilyä								
Lyhytaaltoisen säteilyn roolia ei erotella				x	x	x		
Lyhytaaltoisen säteilyn lähdettä ei tunnisteta				x	x	x		
Väärä käsitys kasvihuonekaasujen jakaumasta ilmakehässä				x	x		x	
Käsitteet kasvihuonekaasut ja saasteet sekoittuvat		x		x		x	x	
Käsitteet aerosoli ja kasvihuonekaasu sekoittuvat						x		

Toisaalta varsin monessa tutkimuksessa havaittiin, että opiskelijoiden itselleen muodostamissa malleissa hiilidioksidi ja/tai kasvihuonekaasut rinnastuivat usein ilmansaasteisiin, joskus myös aerosoleihin (esim. Chang ja Pascua , Rebich ja Gautier 2005). Rebichin ja Gautierin mukaan vaikuttaa siltä, että monet opiskelijat ajattelivat kasvihuonekaasuja ”pahana asiana”, vaikka

tosiasiassa ne ylläpitävät elinkelpoisia oloja Maassa. Näin ajattelevat opiskelijat olivat myös taipuvaisia yhdistämään kasvihuonekaasuihin kaikenlaiset ilmansaasteisiin liittyvät terveys- ja ympäristöongelmat, esimerkiksi happosateet (Boyes ym. 1993, Chang ja Pascua 2016, Rebich ja Gautier 2005).

Otsonikadon ohella toinen virhekäsitysten kokonaisuus liittyy ilmakehän läpi kulkevan lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn rooleihin ja lähteisiin (Taulukko 2). Hyvin yleinen selitysmalli oli se, että tavalla tai toisella ylimääräinen energia jää loukkuun (kasvihuonekaasujen takia) (Andersson ja Wallin 2000, Boyes ym. 1993, Gautier ym. 2006, Rebich ja Gautier 2005). Lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn erilainen käyttäytyminen ilmakehässä ei Rebichin ja Gautierin (2005) mukaan vaikuttanut olevan opiskelijoiden ajatusmalleissa minkäänlaisessa roolissa; vastaavaan tulokseen päätyivät myös Chang ja Pascua (2016). Selitysmalleissa esiintyy usein käsite ”heijastuminen” ilman (oikeita) fysikaalisia perusteluja (Gautier ym. 2006). Samaan kokonaisuuteen liittyy myös käsitys, että loukkuun ei jääkään lämpö tai säteily, vaan kasvihuonekaasut (Rebich ja Gautier 2005). Myös kasvihuonekaasujen jakaumasta ilmakehässä on useissa tutkimuksissa havaittu vääriä käsityksiä, joissa kasvihuonekaasujen tyypillisesti ajatellaan muodostavan kerroksen, joka vangitsee ja/tai heijastaa lämpöä (Chang ja Pascua 2016, Gautier ym. 2006).

Joissakin tutkimuksissa on selvitetty opiskelijoiden käsityksiä ennen opetusta ja sen jälkeen (Gautier ym. 2006, Rebich ja Gautier 2005, Varela ym. 2018). Näissä tutkimuksissa on havaittu, että kurssi onnistui vain jossain määrin korjaamaan virheellisiä käsityksiä. Gautier ym. (2006) totesi, että osa välitestissä hävinneistä virheellisistä käsityksistä oli lopputestiin mennessä ilmestynyt uudelleen. Väärät käsitykset voivat siis olla hyvin resistenttejä. Erityisen resistenttejä vaikuttavat olevan väärät käsitykset kasvihuonekaasujen jakaumasta ilmakehässä (Rebich ja Gautier 2005, Varela ym. 2018). Varsinkin heikoille oppilaille syntyi kurssin aikana myös uusia virhekäsityksiä (Gautier ym. 2006, Varela ym. 2018). Varelan ym. (2018) tutkimuksessa ilmastonmuutos liitettiin ennen opetusta saasteisiin ja hiilidioksidipäästöihin. Opetuksen jälkeen monet oppilaat esittivät happosateet tai otsonikadon ilmastonmuutoksen syiksi. Kirjoittajat arvelevat tämän johtuvan siitä, ettei opettaja tarpeeksi selvästi tehnyt eroa voimistuneen kasvihuoneilmiön ja muiden ympäristöongelmien välillä. Myös käytössä ollut oppikirja esitti nämä aiheet yhteisen otsikon alla.

Opiskelijat eivät vaikuta olevan kovin tietoisia omista vääristä käsityksistään, eivätkä siis ehkä ole kurssin aikana kokeneet tarvetta korjata omaa teoriarakennettaan (Gautier ym. 2006). Wachholtz ym. (2014) kysyivät opiskelijoiden omaa käsitystä siitä, miten hyvin he tuntevat ja ymmärtävät ilmastonmuutoksen taustalla vaikuttavia prosesseja. Vaikka yli puolet (63 %) opiskelijoista koki ymmärtävänsä asian kohtalaisen tai erittäin hyvin, muussa kyselyssä heillä oli suuria puutteita peruskäsitteiden hallinnassa: oikein-väärin-kysymykseen siitä, oliko otsonikerroksessa oleva reikä merkittävä syy ilmastonmuutokseen, 43 % vastasi kyllä ja 41 % en tiedä.

Lähes kaikissa tutkimuksissa toistunut otsoniaukkomalli on Anderssonin ja Wallinin (2000) sekä Changin ja Pascuan (2016) mukaan virheellisyydestään huolimatta jokseenkin eheä ja looginen: Otsonikerros suojelee maata auringonsäteiltä. Mitä ohuempi otsonikerros, sitä enemmän säteilyä pääsee läpi. Säteilyllä on lämmittävä vaikutus. Kerroksessa tapahtuva heikkeneminen johtaa siis lämpenemiseen. Ihmisen tuottavat yhdisteet ohentavat kerrosta, joten ihmiset ovat syypäitä lämpenemiseen. Opiskelijoiden mentaalimallista puuttui yleensä Maan lämpösäteily kokonaan, ja sen korvasi auringon ja/tai ihmistoiminnan tuottama lämpö (Chang ja Pascua 2016). Myös Rebich ja Gautier (2005) esittävät johtopäätöksen, etteivät opiskelijat ajattele Maata (tai kasvihuonekaasuja) säteilevinä kappaleina.

4. Tutkimusmetodologia

4.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Keväällä 2017 fysiikan ylioppilaskokeessa oli jokeritehtävänä Tehtävä 13 (yle.fi, Liite 1), jossa kokelaan piti selittää ilmastonmuutokseen liittyviä käsitteitä. Fysiikan kokelaista yli 70 % vastasi tehtävään, mutta heikoin tuloksin: pisteiden keskiarvo oli 2,4/9 ja moodi 2/9. Tehtävän c-kohdassa piti pohtia syitä siihen, että ilmakehän kohonnut hiilidioksidipitoisuus muuttaa ilmastoa. Tarkasteluun otettiin mukaan myös tehtävän a-kohta (”Mitä tarkoittaa maapallon ilmastoon liittyvä termi kasvihuoneilmiö?”), koska monet kokelaista sisällyttivät jo tähän vastaukseen hiilidioksidiin liittyviä seikkoja.

Hyvän vastauksen piirteissä mainitaan hiilidioksidiin liittyen seuraavaa: ”Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu. Hiilidioksidi jakautuu koko ilmakehään, kun taas vesihöyryä on paljon vain lähellä maan pintaa. Hiilidioksidi absorboi maapallon infrapunasäteilyä ja lämmittää myös ylempiä ilmakerroksia. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu nostaa entisestään ilmakehän lämpötilaa. Koska vesihöyryn määrä on riippuvainen ilman lämpötilasta, myös vesihöyryn määrä kasvaa. Tällöin kasvihuoneilmiö voimistuu, mikä voi ilmetä maapallon keskilämpötilan nousuna. Vesihöyrypitoisuuden vaihtelu ilmassa on nopeaa, mutta hiilidioksidi poistuu ilmakehästä hitaasti.” (yle.fi, Liite 1)

Tämän työn tutkimusongelmana oli selvittää, millaisia hiilidioksidiin liittyviä käsityksiä kokelailla oli. Ongelmaa lähestyttiin seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

1. Millaisia käsityksiä hiilidioksidin roolista ilmastonmuutoksessa kokelailla esiintyi?
2. Millaisia käsityksiä hiilidioksidin vaikutusmekanismeista kokelailla esiintyi?

4.2 Aineisto ja sen käsittely

Suomalainen ylioppilastutkinto on lukion oppimäärän suorittamisen jälkeen järjestettävä valtakunnallinen koe, jolla ”selvitetään, ovatko opiskelijat omaksuneet lukion opetussuunnitelman mukaiset tiedot ja taidot sekä saavuttaneet lukiokoulutuksen tavoitteiden mukaisen riittävän kypsyysden” (ylioppilastutkinto.fi). Keväällä 2017 ylioppilaskokeeseen kuului vähintään neljä koetta, joista äidinkieli oli pakollinen kaikille. Reaaliaineiden kokeet järjestettiin kussakin oppiaineessa erikseen.

Fysiikan reaalikokeessa oli 13 tehtävää, joista enintään kahdeksaan sai vastata. Tehtävät arvosteltiin pistein 0–6 paitsi kaksi ”jokeritehtävää”, joiden maksimipistemäärä oli 9. Jokeritehtävät olivat muita vaativampia tehtäviä. Sekä tavallisten että jokeritehtävien joukossa oli oppiainerajat ylittäviä tehtäviä, joita ei merkitty erikseen (ylioppilastutkinto.fi). Tehtävä 13 oli luonteeltaan oppiainerajat ylittävä jokeritehtävä.

Tutkimuksen aineistona oli otos kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokeen vastauksista. Tutkimukseen poimittiin mukaan 19 lukion abiturienttien kaikki vastaukset tehtävään 13, yhteensä 243 vastausta. Paperille käsin kirjoitetut vastaukset skannattiin ja kirjoitettiin taulukkolaskentaohjelmaan (Excel). Lukioiden jakautuminen maakunnittain on esitetty Taulukossa 3. Keväällä 2017 ylioppilaskirjoituksiin osallistuneiden opetus noudatti lukion opetussuunnitelman perusteita vuodelta 2003 (Opetushallitus 2003).

Taulukko 3. Lukioiden jakautuminen maakunnittain.

Maakunta	Kouluja	Vastaajia	Osuus vastaajista, %
Etelä-Pohjanmaa	1	8	3,3
Helsinki	3	45	18,5
Kainuu	1	18	7,4
Kanta-Häme	2	18	7,4
Lappi	1	2	0,8
Pirkanmaa	1	19	7,8
Pohjanmaa	1	9	3,7
Pohjois-Savo	3	28	11,5
Satakunta	1	5	2,1
Uusimaa	3	49	20,2
Varsinais-Suomi	2	42	17,3
Yhteensä	19	243	100,0

4.3 Aineiston analyysi

Tutkimusmenetelmänä käytettiin temaattista analyysiä. Temaattinen analyysi on kvalitatiivisen analyysin menetelmä, jonka avulla voidaan tunnistaa ja analysoida teemoja käsiteltävästä aineistosta (Braun & Clarke 2006). Teema määritellään niin, että se ilmentää jotakin tärkeää, säännönmukaisesti ilmenevää seikkaa aineistosta suhteessa tutkimuskysymykseen.

Temaattisen analyysin lähtökohtana ei ole mikään tietty teoria, vaan se soveltuu käytettäväksi monenlaisista teoreettisista lähtökohdista. Braun ja Clarke (2006) kuitenkin varoittavat ajattelemasta, että teemat ”nousevat aineistosta”; niiden tunnistaminen on tutkijan aktiivisen työn tulos, ja tutkijan oletukset ja valinnat (mikä on kiinnostavaa?) vaikuttavat voimakkaasti lopputulokseen. Tutkijan on siksi tunnistettava ja tuotava julki omat oletuksensa, aiempi perehtyneisyytensä aiheen luonnontieteelliseen perustaan ja aiheesta tehtyihin tutkimuksiin sekä teoreettinen taustansa. Tämän työn teoreettisena viitekehyksenä on edellä kuvattu konstruktivistinen käsitys oppimisesta ja käsitteenmuodostuksesta.

Sähköiseen muotoon tallennetuista vastauksista poimittiin kaikki lauseet, jotka liittyivät hiilidioksidiin. Jos a- ja c-kohdan vastauksien perusteella vaikutti selvältä, että kokelas tiesi hiilidioksidin olevan kasvihuonekaasu, kaikki kasvihuonekaasuja koskevat maininnat katsottiin myös hiilidioksidia koskeviksi. Jokaiselle vastaukselle merkittiin alustaviksi luokiksi kaikki sopivat vaihtoehdot. Vastaukset käytiin läpi useamman kerran, kunnes toimiva ja vakiintunut luokittelu löytyi. Jäljelle jääneet päällekkäisyydet johtuvat siitä, että vastaaja on esittänyt vastauksessaan useita tässä työssä vaihtoehtoisiksi katsottuja käsityksiä (usein yhden tehtävän a- kohdassa ja toisen c-kohdassa). Luokittelu lähti aineistosta ja oli näin luonteeltaan induktiivista (Braun & Clarke 2006): sitä ei (tietoisesti) yritetty sovittaa mihinkään ennalta valittuun luokitteluun. Kuhunkin luokkaan saatiin näin 1–229 havaintoa.

”Tunnistetuksi teemaksi” valittiin jokin hiilidioksidiin, sen rooliin ilmastonmuutoksessa tai vaikutusmekanismeihin liittyvä käsitys. Mahdollisia muihin aihepiireihin liittyviä säännönmukaisuuksia ei käsitelty. Tarkempaan analyysiin otettiin mukaan pääsääntöisesti temaattisessa analyysissä havaitut teemat, joihin saatiin vähintään kolme havaintoa. Tästä tehtiin kuitenkin muutama poikkeus, jos vain 1–2 mainintaa saaneen teeman katsottiin liittyvän johonkin enemmän havaintoja saaneeseen teemaan. Teemoja tunnistettiin näin menetellen yhteensä 39. Tunnistetut teemat luokiteltiin edelleen sen mukaan, liittyivätkö ne hiilidioksidin

rooliin ilmastonmuutoksessa (yksi pääluokka) vai johonkin vaikutusmekanismiin (neljä pääluokkaa).

4.4 Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys

Vastaukset anonymisoitiin ennen niiden tarkastelua, eikä aineisto sisältänyt yksilöityä tietoa kokelaan koulusta tai koulun paikkakunnasta. Yksittäistä vastaajaa ei näin ollen voi tunnistaa aineistosta tai tuloksista. YTL on myöntänyt aineiston anonymisoidulle tutkimuskäytölle tutkimusluvan.

Otokseen poimittujen vastaajien tehtävästä 13 saamien pisteiden keskiarvo oli 2,4 ja moodi 2. Otos vaikuttaisi siis edustavan kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokelaiden joukkoa varsin hyvin. Tehtävän hiilidioksidia koskevasta c-kohdasta otoksen vastaajat saivat keskimäärin 0,8 pistettä kolmesta (moodi 1/3).

5. Fysiikan ylioppilaskokelaiden käsityksiä hiilidioksidin roolista ilmastonmuutoksessa

5.1. Hiilidioksidin rooliin liittyviä käsityksiä

Noin puolet vastaajista (113 vastaajaa, 47 %) nimesi hiilidioksidin kasvihuonekaasuksi (Taulukko 4), ja lähes kaikki (229 vastaajaa, 94 %) liittivät kasvihuonekaasujen tai hiilidioksidin pitoisuuden kasvamisen globaaliin lämpenemiseen. Yli puolella (142 vastaajaa, 58 %) oli yleinen käsitys siitä, että hiilidioksidi/kasvihuonekaasut estävät tavalla tai toisella lämpösäteilyn poistumista maapallolta tai ilmakehästä. Lähes yhtä moni (119 vastaajaa, 49 %) esitti, että hiilidioksidi/kasvihuonekaasut estävät auringon valon, säteilyn ja/tai energian poistumista. Näissä kahdessa kategoriassa oli jonkin verran päällekkäisyyttä (niistä 142 kokelaasta, jotka vastasivat hiilidioksidin estävän lämpösäteilyn poistumista, 59 tarjosi myös jälkimmäistä selitysmallia). Harvoin mainittuja olivat sen sijaan hyvän vastauksen piirteissä esiintyvät hiilidioksidin pitkä elinikä ilmakehässä (neljä mainintaa) ja se, että hiilidioksidia on ilmakehässä myös luontaisesti (15 mainintaa) (Taulukko 4).

”Ilmakehän lisääntynyt hiilidioksidipitoisuus nostaa maapallon lämpötilaa, koska maanpinnalta tuleva lämpösäteily ei pääse ”karkaamaan” avaruuteen läheskään niin helposti kuin pienemmällä hiilidioksidipitoisuudella. Tämä ilmakehään jumiin jäänyt lämpösäteily nostaa yleisesti maapallon keskilämpötilaa.” (K19V3)

Taulukko 4. Käsityksiä hiilidioksidiin liittyvistä lämpenemisen syistä.

Käsitys	n	%
CO ₂ -pitoisuuden /kasvihuonekaasupitoisuuden nousu aiheuttaa lämpenemistä	229	94,2
CO ₂ on kasvihuonekaasu	113	46,5
CO ₂ /kasvihuonekaasut estävät lämpösäteilyn /lämmön poistumista	142	58,4
CO ₂ /kasvihuonekaasut estävät (aurion) valon/säteilyn/energian poistumista	119	49,0
CO ₂ poistuu ilmakehästä hitaasti	4	1,6
CO ₂ on myös luonnollisesti ilmakehässä	15	6,2

5.2. Vaikutusmekanismeihin liittyviä käsityksiä

Vastaajista 31 (13 %) nimesi lämpösäteilyn lähteeksi Maan (Taulukko 5). Osassa näistäkin vastauksista jäi epäselväksi, pitikö vastaaja Maata lämpösäteilyn emittoijana vai heijastajana. Vain 18 vastaajaa (7 %) käsitteli vastauksessaan Maahan saapuvan ja Maasta lähtevän säteilyn erilaisia aallonpituuksia. Tämän lisäksi kuusi vastaajaa totesi, että tulo- ja lähtösäteilyllä on erilainen energia. Selvästi useampi (35 vastaajaa, 14 %) kuitenkin tiesi, että kasvihuonekaasut absorboivat infrapuna/lämpösäteilyä. Kasvihuonekaasujen ”läpinäkyvyys” lyhytaaltoisemmalle säteilylle ja toisaalta lämpösäteilyn re-emittointi mainittiin vain hyvin harvoin (viisi ja seitsemän vastausta).

”Hiilidioksidi aiheuttaa kasvihuoneilmiön voimistumista maapallolla. Kun lämpö heijastuu kohti avaruutta, osa lämmöstä heijastuu ilmakehästä takaisin. Hiilidioksidi heijastaa tätä lämpöä enemmän kuin ilmakehän muu ilma, joten kun hiilidioksidin määrä ilmakehässä kasvaa, myös ilmakehästä takaisinheijastuneen lämmön määrä kasvaa ja kasvihuoneilmiö kiihtyy entisestään.” (K1V16)

Taulukko 5. Vaikutusmekanismiin liittyviä käsityksiä

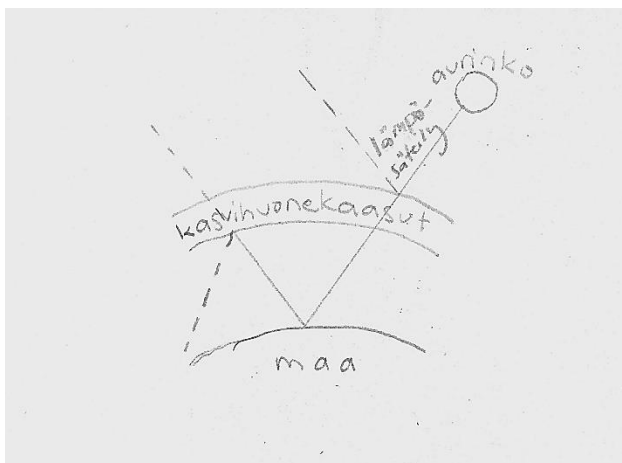
Käsitys	n	%
Lämpösäteilyn lähde maa	31	12,8
Tulo- ja lähtösäteilyllä erilainen aallonpituus	18	7,4
Tulo- ja lähtösäteilyllä erilainen energia	6	2,5
CO ₂ /kasvihuonekaasut absorboivat infrapuna/lämpösäteilyä/lämpöä	35	14,4
CO ₂ /kasvihuonekaasut läpäisevät lyhytaaltoista säteilyä/valoa	5	2,1
CO ₂ /kasvihuonekaasut re-emittoivat infrapuna/lämpösäteilyä	7	2,9
Estää heijastumista /heijastuneen säteilyn pääsyn ulos ilmakehästä	136	56,0
Absorboi maasta heijastunutta infrapuna/lämpösäteilyä/lämpöä	7	2,9
Heijastaa auringonsäteitä /säteilyä /valonsäteitä	59	24,3
Heijastaa lämpösäteilyä	50	20,6
Heikentää Auringon valon pääsyä Maahan	4	1,6
Ei pääse pois ilmakehästä kasvihuoneilmiön takia	8	3,3

Selvästi yleisempi selitysmalli liittyi heijastumiseen (Taulukko 5). Yli puolet vastaajista (136 vastausta, 56 %) esitti, että hiilidioksidi estää säteilyn heijastumista Maasta tai heijastuneen säteilyn ulospääsyä ilmakehästä tavalla tai toisella (Taulukko 5). Suuri valtaosa näistä vastaajista (yhteensä 110 vastausta, 45 % kaikista) tarjosi selitykseksi sitä, että

hiilidioksidi heijastaa joko auringonsäteitä/säteilyä (59 vastausta) tai lämpösäteilyä (50 vastausta). Vastaajista seitsemän arveli, että hiilidioksidi absorboi heijastunutta lämpösäteilyä. Kahdessa viimeisessä teemassa oli jonkin verran päällekkäisyyttä: kuusi vastaajaa tarjosi absorptiota ja heijastamista erillisinä selityksinä. Lisäksi neljä kokelasta vastasi hiilidioksidin heikentävän auringonvalon pääsyä maanpinnalle ja kahdeksan arveli, että hiilidioksidi (tai muut kaasut) eivät pääse pois ilmakehästä kasvihuoneilmiön takia (Taulukko 5).

”Maahan tulevista auringonsäteistä aiheutuvasta lämmöstä osa heijastuu takaisin avaruuteen. Ilmakehän lisääntynyt päästökerros ei päästä lämpöä pois vaan lämpö jää ilmakehän sisäpuolelle, mistä johtuu maapallon lämpötilan nousu.” (K5V15)

Yksikään vastaajista ei tuonut esiin hyvän vastauksen piirteissä esiintyvää mainintaa siitä, että hiilidioksidi jakautuu koko ilmakehään (Taulukko 6). Sen sijaan 26 vastaajaa (11 %) arveli hiilidioksidin muodostavan ilmakehään jonkinlaisen rajapinnan, kerroksen tai pilven. Tällaiseen vastaukseen oli usein liitetty Kuvan 13 kaltainen piirros. Kaksi kokelasta esitti tämän kerroksen muodostuvan alailmakehään, kahdeksan ilmakehän yläosiin. Ilmakehää ohentava/heikentävä ja sen vastakohtana ilmakehää paksuntava vaikutus olivat yhtä yleisiä (kummassakin kuusi havaintoa). Kolmessa vastauksessa kerrottiin, että hiilidioksidipitoisuuden nousu voi johtaa myös ilmaston kylmenemiseen, mahdollisesti lämpenemisjakson jälkeen (Taulukko 6).



Kuva 13. Vastaukseen liitetty kuva, jossa näkyy kasvihuonekaasujen muodostama kerros.(Piirretty uudelleen K4V3 mukaan)

”Kasvihuoneilmiö on ilmiö joka mahdollistaa elämän maapallolla. Sen toiminta perustuu hiilidioksidiin jota on ilmakehässä. Auringosta tulevilla säteillä on riittävä energia läpäistä hiilidioksidi kerros. Kuitenkin niiden osuessa maahan ja kimmotessa takaisin niiden energia vähenee ja vain osa pääsee takaisin avaruuteen näin säteet kimpoavat takaisin kohti maata lämmittäen sitä.” (K6V10)

Taulukko 6. Käsitteitä jakautumisesta ja vaikutuksista ilmakehään.

Käsitys	n	%
Jakautuu koko ilmakehään	0	0,0
Muodostaa ilmakehään rajapinnan /kerroksen/pilven	26	10,7
Kerääntyy ilmakehän yläosiin	8	3,3
Jää alailmakehään	2	0,8
Ohentaa/heikentää ilmakehää	6	2,5
Paksuntaa ilmakehää	6	2,5
Ilmastomuutoksen seurauksena voi olla myös kylmeneminen	3	1,2

Hiilidioksidin ja otsonikerroksen välisiin yhteyksiin liittyvistä käsityksistä yleisin oli se, että CO₂ ohentaa otsonikerrosta (53 vastausta, 22 %, Taulukko 7). Näin vastanneista suurin osa selitti kasvihuoneilmiöön liittyvän lämpenemisen (kokonaan tai osittain) sillä, että ohentunut otsonikerros päästää lävitseen lisää auringon säteilyä, mistä seuraa lämpenemistä (37 vastausta, 15 % kaikista vastauksista). Loput vastasivat, että heikentynyt otsonikerros päästää läpi enemmän UV-säteilyä tai ”haitallista säteilyä”. Muutamia mainintoja saivat myös käsitykset, että hiilidioksidi paksuntaa otsonikerrosta ja että lisääntynyt otsoni estää hiilidioksidin poistumista ilmakehästä (neljä ja viisi mainintaa) (Taulukko 7).

Taulukko 7. Otsonikerrokseen liittyviä käsityksiä

Käsitys	n	%
Ohentaa otsonikerrosta	53	21,8
Ohentunut otsonikerros päästää lisää säteilyä läpi, mistä aiheutuu lämpenemistä	37	15,2
Ohentunut otsonikerros päästää lisää (haitallista) UV-säteilyä läpi	15	6,2
Paksuntaa otsonikerrosta	4	1,6
lisääntynyt otsoni estää auringon säteilyn poistumista	5	2,1

”Kasvihuoneilmiö tarkoittaa ilmiötä, jossa Maapallon lämpötila kohoaa ilmakehän otsonikerroksen ohentumisen seurauksena. Otsonikerros ohentuu erilaisten saasteiden vaikutuksesta. Ohentuneen otsonikerroksen läpi tulee entistä enemmän ultraviolett- ja infrapunasäteilyä Auringosta, mutta kun säteily heijastuu maan pinnasta takaisin taivaalle, se ei pääsekkään saasteiden läpi avaruuteen vaan jaa Maapallolle, jolloin maan lämpötila kohoaa.” ... ”Lisääntynyt hiilidioksidipitoisuus muuttaa ilmastoa, koska hiilidioksidi (CO₂) reagoi ilmakehän otsonin (O₃) kanssa jolloin Maan pintaa liialta säteilyltä suojaava otsonikerros ohenee. Kasvit tarvitsevat hiilidioksidia yhteyttämiseen, mutta CO₂-pitoisuuden ollessa liian suuri eivät kasvit saa kulutettua kaikkea.” (K9V17)

Myös erilaiset hiilidioksidin ja hiukkaset tai saasteet yhdistävät käsitykset olivat varsin yleisiä (Taulukko 8). 10 kokeista rinnasti hiilidioksidin hiukkasiin, 22 ilmansaasteisiin. Hiukkasiin rinnastumiseen liittyi muutamalla vastaajalla käsitys siitä, että CO₂ tummentaa jäätiköitä (kolme mainintaa). Saasteisiin rinnastumiseen liittyi usein käsitys siitä, että saasteet aiheuttavat kasvihuoneilmiötä (12 mainintaa).

Taulukko 8. Saastumiseen liittyviä käsityksiä.

Käsitys	n	%
Rinnastuu hiukkasiin	10	4,1
Tummentaa jäätiköitä	3	1,2
Aiheuttaa happamoitumista	4	1,6
Aiheuttaa happosateita /myrkkysateita	9	3,7
reaktioissa muodostuu uusia yhdisteitä	5	2,1
sitoo/vähentää happea	5	2,1

”Vesimolekyylit kiinnittyvät helposti ilman pieniin epäpuhtauksiin ja tummiin hiukkasiin kuten myös hiilidioksidimolekyyleihin. Tämä voidaan nykyisin myös havaita esimerkiksi Kiinan saasteisimmissa kaupungeissa joissa ilmassa on paljon epäpuhtauksia. Ilma ei ole kirkasta ja taivas näyttää aina "autereiselta". Ilmakehässä suuremmaksi kasvaneet pisarat varastoivat lämpöä ja ilmakehä lämpenee ja kasvihuoneilmiö voimistuu. Sateen ja lumen mukana hiukkaset päätyvät maahan ja jäätiköille päätyessään ne myös edistävät sen sulamista sillä tummat hiukkaset keräävät lämpöä. Paljon hiilidioksidia sisältävä ilma voi myös toimia niin, että se sitoo ja heijastaa auringon valoa ja estää sen pääsyn maanpinnalle, jolloin ollaan epäilty että se voisi myös toimia ilmastoa viilentävänä tekijänä. Maapallon historiassa näin on käynytkin, sillä ollaan epäilty että dinosaurukset kuolivat sukupuuttoon tulivuoren purkauksen seurauksena samentuneen ilmakehän ja sen seurauksena kylmenneen ilmaston vuoksi.” (K10V9)

Hiilidioksidin arveltiin myös reagoivan muiden yhdisteiden kanssa niin, että muodostuu uusia yhdisteitä tai otsonia tai sitoutuu happea (kukin viisi mainintaa) (Taulukko 8). Lisäksi vastaajista yhdeksän esitti, että hiilidioksidi aiheuttaa happo- tai myrkkysateita. Vesistöjä tai vesiekosysteemejä happamoittavan vaikutuksen mainitsi neljä kokelasta. Vastauksista ei pystynyt erottelemaan sitä, tarkoittivatko kokelaat esimerkiksi Suomessa makeissa vesissä havaittua (todellisuudessa rikki- ja typpiyhdisteistä johtuvaa) happamoitumista vai valtamerten happamoitumista (jossa CO₂ on merkittävä tekijä).

5.3 Pohdinta

Kaikki fysiikan kevään 2017 ylioppilaskokelaat ovat opiskelleet maantietoa vähintään yhden kurssin (GE1, Sininen planeetta). Osa on luultavasti opiskellut myös syventävän kurssin GE3 (Riskien maailma). Kokelaiden vastauksissaan osoittama kasvihuoneilmiöön liittyvän fysiikan ymmärrys oli hyvin vaihtelevaa, mikä oli odotettavissa tehtävästä keskimäärin saatujen heikkojen pisteiden perusteella. Tyypillisesti vastaukset jäivät yleisluontoisiksi, mikä näkyy myös tuloksiin poimituissa aineistositaateissa. Käsitysten yleisluontoisuutta kuvaa hyvin se, että lähes kaikki vastaajat liittivät kasvihuonekaasujen tai hiilidioksidin pitoisuuden kasvamisen globaaliin lämpenemiseen ja heillä oli yleinen käsitys siitä, että hiilidioksidi estää, tavalla tai toisella, alun perin auringosta peräisin olevan säteilyn palaamista avaruuteen, mutta vain harva pystyi kuvaamaan ilmiöön liittyviä fysikaalisia prosesseja edes osittain oikein.

Useimmissa muissa opiskelijoiden käsityksiä selvittäneissä tutkimuksissa on keskitytty tarkastelemaan nimenomaan virheellisiä käsityksiä (Taulukko 2). Edellä mainittu selitysmalli, jonka mukaan ylimääräinen energia jää kasvihuonekaasujen takia tavalla tai toisella ”loukkuun”, on havaittu muissakin tutkimuksissa hyvin yleiseksi (Anderson ja Wallin 2000, Boyes ym. 1993, Chang ja Pascua 2016, Rebich ja Gautier 2005). Malli ei kuitenkaan kerro, miksi näin käy. Vastaukseksi tarjotaan Gautierin ym. (2006) mukaan usein ”heijastumista” ilman fysikaalisia perusteluja. Havainto tukee tämän tutkimuksen tuloksia: yli puolet vastaajista selitti ”loukkuun jäämistä” sillä, että hiilidioksidi estää säteilyn heijastumista Maasta tai heijastuneen säteilyn ulospääsyä ilmakehästä. Usein tällaisessa vastauksessa käytettiin sanaa ”kimpoaa”, jonka fysikaalinen merkitys on kappaleen (tai hiukkasen) kimpoaminen törmäyksen seurauksena. Kohtalaisen moni mainitsi, että kasvihuonekaasut absorboivat infrapuna/lämpösäteilyä, mutta hyvin usein absorboitavan säteilyn esitettiin ensin heijastuneen maasta. Ylivoimaisesti suurin hiilidioksidiin liittyvä, selvästi virheellinen käsitys oli kuitenkin se, että hiilidioksidi heijastaa lämpösäteilyä tai yleisesti ottaen Auringon säteilyä. Sanoja ”heijastuu”, ”absorboituu” ja ”kimpoaa” käytettiin vastauksissa jossain määrin mielivaltaisen oloisesti. Kyse voi olla huolimattomasta kielenkäytöstä tai siitä, ettei opiskelijoille missään vaiheessa ole muodostunut käsitystä siitä, mitä eroa näillä on.

Hyvin yleinen ajatus heijastumisesta on todennäköisesti yhteydessä tässä tutkimuksessa kolmanneksi yleisimpään virhekäsitykseen, jonka mukaan hiilidioksidi muodostaa ilmakehään jonkinlaisen kerroksen tai rajapinnan; tieteellisen käsityksen mukaista selitystä ei tarjonnut yksikään vastaaja. Vääriä käsityksiä hiilidioksidin jakautumisesta ilmakehään on havaittu myös

muissa tutkimuksissa (Chang ja Pascua 2016, Gautier ym. 2006). Ajatus heijastumisesta tuntuu intuitiivisesti mielekkäältä, jos ilmakehään on mielessään luonut jonkinlaisen peilimäisen, heijastavan kerroksen.

Tässä tutkimuksessa noin joka kymmenes vastaaja mainitsi, että tulo- ja lähtösäteilyllä on erilainen aallonpituus tai energia. Osuus ei ole suuri, mutta tilanne vaikuttaa kuitenkin hieman paremmalta kuin Gautierin ym. (2006) tai Changin ja Pascuan (2016) tutkimuksissa, joiden perusteella he totesivat, ettei sähkömagneettisen säteilyn eri lajeilla tunnu olevan minkäänlaista roolia opiskelijoiden ajattelussa. Valtaosa ylioppilaskokelaista vaikuttaa kuitenkin kuuluvan tähän joukkoon, ja heijastumisen korostuminen selitysmallina vahvistaa kuvaa.

Toiseksi yleisin hiilidioksidiin liittyvä, selvästi virheellinen käsitys ylioppilaskokelaiden vastauksissa oli se, että hiilidioksidi tuhoaa otsonikerrosta. Samanlaisia tuloksia sai muun muassa Boon (2009). Reinfriedin ym. (2012) ”otsoniaukkomalliksi” nimeämässä, sinänsä loogisessa ajattelumallissa ohentuneesta otsonikerroksesta seuraa lämpenemistä lisääntyneen säteilyn vuoksi. Vastaavaa logiikkaa oli nähtävissä nyt tarkastelluissa vastauksissa, sillä suurin osa niistä, jotka arvelivat hiilidioksidin tuhoavan otsonikerrosta (53), käytti tätä ilmaston lämpenemisen selityksenä (37).

Monet sekä muissa tutkimuksissa havaituista että tässä työssä esiin tulleista käsityksistä liittyvät jollain tavalla ajatukseen kasvihuonekaasuista lähtökohtaisesti ”pahana asiana”, kuten Rebich ja Gautier (2005) tilannetta kuvasivat. Nyt käsillä olevassa työssä esiin nousivat edellä mainittujen lisäksi virheelliset käsitykset hiilidioksidista muun muassa happosateiden aiheuttajana, jäätiköiden tummentajana ja yleisesti ottaen ilmansaasteena. Vastaavia tuloksia ovat saaneet esimerkiksi Boyes ym. (1993), Chang ja Pascua (2016) sekä Rebich ja Gautier (2005).

Tässä työssä saadut tulokset sopivat hyvin yhteen Reinfriedin ym. (2012) oppikirjojen puutteita käsittelevän teorian ja toisaalta tarkasteltujen suomalaisten oppikirjojen esitystavan kanssa. Ilmastonmuutos ja saastuminen on tyypillisesti opiskeltu samassa yhteydessä Choin ym. (2010) kuvaamalla tavalla, jolloin niihin liittyvät käsitteet ja mekanismit sekoittuvat helposti nyt tarkastelluissa vastauksissa havaituilla tavoilla. Oppimateriaalin tapa kuvittaa kasvihuoneilmiötä näkyy hyvin selkeästi opiskelijoiden vastauksissa ja niihin liitetyissä piirroksissa. Opetuksessa ei ehkä myöskään ole tehty kovin selkeää jakoa

kasvihuonekaasupäästöjen ja saastepäästöjen tai toisaalta kaasujen ja hiukkasten välillä, jolloin nämä rinnastuvat helposti toisiinsa.

Opiskelijoilla on siis paljon sekä puutteellisia että selvästi virheellisiä käsityksiä ilmastomuutoksen fysiikasta, ja nämä käsitykset ovat samanlaisia kuin eri puolilla maailmaa viime vuosikymmeninä havaitut virhekäsitykset. Jollakin tavalla oppijan henkilökohtainen konstruktio on siis johtanut johonkin muuhun kuin tavoitteena olevaan käsitykseen aiheesta. Onko niin, että oppilaalle jäänyt virheellinen käsitys johtuu siitä, ettei Glasersfeldin (1982) kuvailemaa häiriötilannetta ole missään vaiheessa syntynyt? On ajateltavissa, että ilmastomuutos on aiheena niin abstrakti, ettei sen paremmin oikea kuin vääräkään koulussa omaksuttu malli ole missään kosketuksissa omiin konkreettisiin kokemuksiin. Opiskelija ei välttämättä myöskään ole kokenut esimerkiksi vaikutusmekanismien täsmällistä ymmärtämistä tärkeäksi. Ilmastomuutoksesta syntyvä käsiterakennelma on tällöin välttämättä hyvin suurpiirteinen. Mallin sisäiset ristiriidat (esimerkiksi se, että lämpösäteily voi opiskelijan ajatuksissa päästä helposti sisään, mutta ei ulos) eivät tällaisessa rakennelmassa todennäköisesti myöskään tunnu kovin merkittäviltä.

Ylioppilaskokeen oppiainerajoja ylittävä jokeritehtävä on tarkoituksella sellainen, ettei opiskelijalla todennäköisesti ole valmista vastausmallia muistissaan, vaan hän joutuu ainakin osittain luomaan käsityksensä koetilanteessa, käytössään olevien mentaalisten mallien pohjalta, kuten Taber (2009) kuvailee. Nyt tarkastellun tehtävän aiheena ollutta ilmastomuutosta ei todennäköisesti useimmissa kouluissa ole käsitelty fysiikan tunneilla lainkaan, ja oppikirjojen perusteella voidaan olettaa, että maantiedon kurssilla fysikaaliset perustelut on esitetty hyvin kevyesti. Sisäinen malli ilmastomuutoksen fysikaalisista perusteista on ymmärrettävästi voinut jäädä ohueksi, kuten tämän työn tuloksista voidaan havaita. Voi olla, ettei opiskelija ole koskaan aiemmin verbalisoinut malliaan tai perustellut sitä edes itselleen. Suomalaisen fysiikan ylioppilaskokelaan käsityksiin ilmastomuutoksesta vaikuttaa varmasti myös Ausubelin (1968) kuvaama tekijä: oppijan aikaisemmat käsitykset ovat hyvin kestäviä, koska ne ovat olleet olemassa kauan, ne ovat ankkuroituneet hyvin pysyviin rakenteisiin ja ovat yleisluontoisempia kuin tieteelliset selitykset.

On todennäköistä, että kevään 2017 ylioppilaskokelaiden lukiossa saama luonnontieteiden opetus on ollut luonteeltaan enimmäkseen reduktionistista, kuten Orgill ym. (2019) kuvaavat: luonnon ilmiöitä on pyritty yksinkertaistamaan, jotta niiden mallintaminen olisi

suoraviivaisempaa. Systeemiajattelua ei välttämättä ole tuotu esille, saati sitten harjoiteltu. Ilmastonmuutoskin on näin näyttäytynyt monimutkaisena palapelinä, jonka osien väliset vuorovaikutukset, takaisinkytkennät, organisaatiotasot ja ajalliset muutokset ovat jääneet hahmottumatta. Huomio on saatettu kiinnittää systeemin yksittäisiin osiin, ei kokonaisuuteen. Toisaalta mahdolliselta tuntuu myös edellisen vastakohta: tarkastelussa on ollut vain ”yleiskuva”, jolloin sen osat ja niiden väliset yhteydet jäävät kokonaan huomiotta. Molemmissa tapauksissa ilmiön syvällinen ymmärtäminen on vaikeaa, ellei mahdotonta.

Tulosten perusteella vaikuttaa selvältä, ettei ylioppilaskokelaan tieto ilmastonmuutoksesta yleensä yllä lähellekään asiantuntijatasoa. Matkalla kohti asiantuntijuutta tietorakenteet kehittyvät vähitellen kohti integroidumpaa, koherentimpaa kokonaisuutta. Mikään esimerkiksi Taberin (2009) esittämistä teorioista ei kuitenkaan selitä sitä, miten tämä tapahtuu. Tämä työ herättää joitakin ajatuksia, mutta ei vastaa kysymykseen eikä siihen, miten opiskelijoiden (oikeat tai väärät) käsitykset ovat syntyneet.

6. Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, millaisia hiilidioksidin rooliin ilmastonmuutoksessa ja toisaalta vaikutusmekanismeihin liittyviä käsityksiä suomalaisilla abiturienteilla on. Tutkimus tehtiin kevään 2017 fysiikan ylioppilaskirjoitusten yhden osatehtävän temaattisena analyysinä.

Tutkimuksessa havaittiin, että suomalaisten fysiikan ylioppilaskokelaiden ymmärrys ilmastonmuutoksen fysikaalisista perusteista on hyvin vaihtelevan tasoista. Selvästi virheellisistä käsityksistä yleisimpiä olivat ajatus siitä, että hiilidioksidi heijastaa sähkömagneettista säteilyä, muodostaa ilmakehään jonkinlaisen kerroksen tai rajapinnan ja tuhoaa otsonikerrosta (mikä selittää ilmaston lämpenemisen). Samantyyppisiä virhekäsityksiä on havaittu muissa tutkimuksissa eri puolilla maailmaa, eri koulutustasoilla ja eri aikoina.

Tämä tutkimus ei tarjoa selitystä sille, miten nämä väärät käsitykset ovat muodostuneet. Muissa tutkimuksissa on kuitenkin saatu tämänkin työn tuloksiin sopivia viitteitä siitä, että oppimateriaalien tavalla käsitellä ilmastonmuutosta voi olla merkittävä vaikutus. Luonnontieteiden opetuksen traditiot eivät myöskään todennäköisesti ole ainakaan vielä 2010-luvulla tukeneet opiskelijan systemaattisen ajattelun kehitystä.

7. Kirjallisuusluettelo

- Andersson, B. ja Wallin, A. 2000. Students' understanding of the greenhouse effect, the societal consequences of reducing CO₂ emissions and the problem of ozone layer depletion. *Journal of Research in Science Teaching* 37: 1096-1111.
- Antikainen J., Kankkunen J., Karas, K., Kosonen, K., Purhonen, P. A. ja Tolvanen, J. 2006. *GE3: Riskien maailma*. Kustannusosakeyhtiö Tammi.
- Ausubel, D.P. 1968. *Educational Psychology: a cognitive view*. Holt, Rinehart & Winston, New York, USA.
- Bethke, I., Outten, S., Otterå, O.H., Hawkins, E., Wagner, S., Sigl, M. ja Thorne, P. 2017. Potential volcanic impacts on future climate variability. *Nature Climate Change* 7: 799-807.
- Boon, H. 2009. Climate change? When? Where? *The Australian Educational Researcher* 36: 43-65.
- Boyes E., Chuckran D. ja Stanisstreet, M. 1993. How do high school students perceive global climatic change: What are its manifestations? What are its origins? What corrective action can be taken? *Journal of Science Education and Technology* 2: 541-557.
- Braun, V. ja Clarke, V. 2006. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology* 3: 77–101.
- Caballero, R. 2014. *Physics of the atmosphere*. IOP publishing, Bristol, UK. E-kirja. DOI 10.1088/978-0-7503-1052-9.
- Chang, C-H. ja Pascua, L. 2016. Singapore students' misconceptions of climate change. *International Research in Geographical and Environmental Education* 25: 84-96.
- Choi, S., Niyogi, D., Shepardson, D. P. ja Charusombat, U. 2010. Do earth and environmental science textbooks promote middle and high school students' conceptual development about climate change? Textbooks' consideration of students' misconceptions. *BAMS, American Meteorological Society*, doi:10.1175/2009BAMS2625.1
<https://www.climate.gov/teaching/essential-principles-climate-literacy/essential-principles-climate-literacy>. Luettu 13.3.2020.
- Driscoll, M. 2000. *Psychology of Learning for Instruction*. Needham Heights, MA, Allyn & Bacon. 448 s.
- Driver, R., ja Easley, J. 1978. Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in science education* 5: 61-84.
earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earths-albedo. Luettu 7.8.2019.
- Eddy, J. A. 1976. The Maunder minimum. *Science* 192, 1189–1202.

- Ervasti, V., Kytömäki, J. ja Paananen, J. 2006. *Globus: Sininen planeetta*. Werner Söderström Osakeyhtiö.
- Gautier C., Deutsch K. ja Rebich, S. 2006. Misconceptions about the greenhouse effect. *Journal of geoscience education* 54: 386-395.
- Gilbert, J.K., Osborne R.J. ja Fensham, P.J. 1982. Children's science and its consequences for teaching. *Science Education* 66: 623-633.
- Glaserfeld, E.v. 1989. Cognition, construction of knowledge, and teaching. *Synthese* 80: 83-90.
- Graham, S. 2008. Milutin Milankovitch (1879-1958).
earthobservatory.nasa.gov/features/Milankovitch. Luettu 2.8.2019.
- Fabritius, H., Kakko, I., Kenno, P. ja Nowak, A. 2008. *Lukion maantiede 3: Riskien maailma*. Kustannusosakeyhtiö Otava.
- Hathaway, D.H. 2015. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics* 12, 4. DOI 10.1007/lrsp-2015-4.
- Hays, J.D., Imbrie, J. ja Shackleton, N.J. 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194:1121-1132. DOI: 10.1126/science.194.4270.1121
- Hoyt, D.V. ja Schatten, K.H. 1997. The role of the sun in climate change. Oxford University Press, New York, NY, USA. 279 s. (e-kirja)
- Ilmastobarometri 2015*. Tiivistelmä. www.ym.fi.
ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc. luettu 7.8.2019.
- IPCC, 2014. (Core Writing Team, Pachauri, R.K. ja Meyer, L.A: (toim.)). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 s.
- IPCC, 2013. (Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. ja Nifgley, P.M. (toim.)). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kindom and New York, NY, USA. 1535 s.
- Kakko, I., Kenno, P. ja Tyrväinen, H. 2008. *Lukion maantiede 1: Sininen planeetta*. Kustannusosakeyhtiö Otava.
- Kata, A. 2012. Anti-vaccine activists, Web 2.0, and the postmodern paradigm – An overview of tactics and tropes used online by the anti-vaccination movement. *Vaccine*, 30(25), 3778–3789.

- Kielitoimiston sanakirja*. 2018. Helsinki: Kotimaisten kielten keskus. URN:NBN:fi:kotus-201433. www.kotus.fi/sanakirjat/kielitoimiston_sanakirja. Luettu 2.8.2019.
- Knight, J.R., Folland, C.K. ja Scaife, A.A. 2006. Climate Impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters* 33 (L17706). doi: 10.1029/2006GL026242.
- Koponen, I. 2014. Fysiikan käsitteet ja käsiterakenteet. Didaktisen fysiikan näkökulma. Helsinki.
- Kurki-Suonio, K. ja R. 1994. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry, Helsinki. 401 s.
- Likens, G.E. ja Bormann, F.H. 1974. Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science* 184: 1176-1179.
- Mäntylä, T. 2013. Promoting conceptual development in physics teacher education: cognitive-historical reconstruction of electromagnetic induction law. *Science & Education* 22: 1361-1387.
- Opetushallitus. 2003. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003. Määräys 33/011/2003.
- Piaget, J. 1972. *The child's conception of the world*. Littlefield Adams quality Paperbacks.
- Popper, K.R. 1979. *Objective knowledge: An evolutionary approach*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Ravishankara, A.R. 2012. Water vapor in the lower stratosphere. *Science* 337:809-810.
- Rebich S. ja Gautier S. 2005. Concept mapping to reveal prior knowledge and conceptional change in a mock summit course on global climate change. *Journal of Geoscience education* 53: 355-365.
- Reinfried, S., Aeschbacher, U. ja Rottermann, B. 2012. Improving students' conceptual understanding of the greenhouse effect using theory-based learning materials that promote deep learning. *International Research in Geographical and Environmental Education* 21: 155-178.
- Robock, A. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics* 38: 191-219.
- Solomon, J. 1993. The social construction of children's scientific knowledge. Teoksessa: Black, P. ja Lukas, A.M. (toim.) *Children's informal ideas in science*. Routledge, Lontoo, UK.
- stateoftheocean.osmc.noaa.gov/atm/amo.php luettu 5.8.2019.
- Stevenson, K.T., Peterson, M.N. & Bradshaw, A. 2016. How climate change beliefs among U.S. teachers do and do not translate to students. *PloS ONE*, 11(9), e0161462. doi:10.1371/journal.pone.0161462
- Taber, K.S. 2009. *Progressing Science Education: Constructing the Scientific Research Programme into the Contingent Nature of Learning Science*. Springer cop. (e-kirja)

Taber, K.S., 2017. Knowledge, beliefs and pedagogy: how the nature of science should inform the aims of science education (and not just when teaching evolution). *Cultural Studies of Science Education*, 12, 81–91.

Varela B., Sesto V. ja García-Rodeja I. 2018. An investigation of secondary students' mental models of climate change and the greenhouse effect. *Research in Science Education*. DOI 10.1007/s11165-018-9703-1.

yle.fi/aihe/artikkeli/2017/03/14/kaikki-kevaan-2017-yo-kokeet-ja-niiden-vastaukset-loydat-taalta Luettu 9.2.2020.

Wachholtz, S., Artz, N. ja Chene, D. 2013. Warming of the idea: university students' knowledge and attitudes about climate change. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 15: 128-141.

Wong, K.V. 2016. *Climate change*. Momentum Press, New York, NY, USA. <http://search.ebscohost.com.libproxy.helsinki.fi/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1135116&site=ehost-live&scope=site>. Luettu 3.6.2019.

Williamson, M.S., Collins, M., Drijfhout, S.S., Kabana, R., Mecking, J.V. ja Lenton, T.M. 2018. Effect of AMOC collapse on ENSO in a high resolution general circulation model. *Climate Dynamics* 50:2537–2552. DOI 10.1007/s00382-017-3756-0

www.climate.gov/news-features/climate-qa/did-global-warming-stop-1998. Luettu 2.8. 2019.
www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml luettu 5.8.2019.

www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/ luettu 5.8.2019.

www.weather.gov/jetstream/energy. luettu 7.8.2019.

www.weather.gov/news/190504-sun-activity-in-solar-cycle. Luettu 2.8. 2019.

ylioppilastutkinto.fi. Luettu 6.3.2020.

Liitteet

Liite 1. Tehtävä 13 (yle.fi) ja hyvän vastauksen piirteet (ylioppilastutkinto.fi) tehtävän kohtaan c, fysiikan ylioppilaskoe 15.3.2017.

- +13. a) Mitä tarkoittaa maapallon ilmastoon liittyvä termi kasvihuoneilmiö? (2 p.)
b) Miten ilmakehän vesihöyry vaikuttaa ilmastoon? (2 p.)
c) Ilmakehässä on luonnostaan hiilidioksidia. Ihmisen toiminnassa syntyy hiilidioksidia esimerkiksi käytettäessä hiiliperäisiä polttoaineita. Mistä johtuu, että ilmakehän lisääntynyt hiilidioksidipitoisuus muuttaa ilmastoa? (3 p.)
d) Ilmastomuutoksessa keskilämpötilan ennustetaan nousevan erityisesti napa-alueilla. Miten mannerjäätiköiden ja napa-alueiden merijäätiköiden sulaminen voi kiihdyttää lämpötilan nousua? (2 p.)



Jäätikön sulaminen
<peda.net>. Luettu 15.3.2016.

Hyvän vastauksen piirteitä

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu. (1 p.)

Hiilidioksidi jakautuu koko ilmakehään, kun taas vesihöyryä on paljon vain lähellä maan pintaa. Hiilidioksidi absorboi maapallon infrapunasäteilyä ja lämmittää myös ylempiä ilmakerroksia.

(1 p.) Hiilidioksidipitoisuuden kasvu nostaa entisestään ilmakehän lämpötilaa. Koska vesihöyryn määrä on riippuvainen ilman lämpötilasta, myös vesihöyryn määrä kasvaa. Tällöin kasvihuoneilmiö voimistuu, mikä voi ilmetä maapallon keskilämpötilan nousuna.

(1 p.) Vesihöyrypitoisuuden vaihtelu ilmassa on nopeaa, mutta hiilidioksidi poistuu ilmakehästä hitaasti.

Keskilämpötilan nousu voi aiheuttaa ilmastomuutoksen. Ilmastomuutokseen liittyviä ilmiöitä ovat muun muassa merivesien lämpeneminen, merivirtausten muutokset ja sään ääri-ilmiöiden lisääntyminen.